

Manöverbasierte kooperative Automation für teil- und hochautomatisiertes Fahren

Von der Fakultät für Maschinenbau
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig
zur Erlangung der Würde
eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Dissertation

von:	Christian Löper
geboren in (Geburtsort):	Meschede
eingereicht am:	18.01.2019
mündliche Prüfung am:	04.04.2019
Vorsitz:	Prof. Dr.-Ing. Ferit Küçükay
Gutachter:	Prof. Dr.-Ing. Karsten Lemmer
	Dr.-Ing. Uwe Becker

2019

Vorwort des Autors

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner wissenschaftlichen Tätigkeit am Institut für Verkehrssystemtechnik (TS) des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) in Braunschweig. Die Erstellung dieser Arbeit wäre nicht möglich gewesen ohne die Unterstützung von zahlreichen Personen, bei denen ich mich hiermit bedanken möchte.

Zunächst möchte ich mich recht herzlich bei meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr.-Ing. Karsten Lemmer, für seine Unterstützung bedanken. Meinem Zweitprüfer, Herrn Dr.-Ing. Uwe Becker, bin ich ebenso dankbar. Weiterhin möchte ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Ferit Küçükay für die freundliche Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission danken.

Einen besonderen Dank möchte ich an Herrn Prof. Dr. Frank Köster richten. Nur durch seine außerordentlich wertvollen Rückmeldungen zu meiner Arbeit konnte ich sie nach schwierigen Phasen zu einem erfolgreichen Abschluss bringen.

Meinen Kollegen und Kolleginnen am Institut TS danke ich für die vielfältigen inhaltlichen Diskussionen und die fruchtbare Zusammenarbeit in zahlreichen Projekten. Stellvertretend möchte ich die folgenden Kollegen und Kolleginnen namentlich erwähnen: Claas Brunken, Tobias Hesse, Johann Kelsch, Sascha Knake-Langhorst, Anna Schieben, Julian Schindler, Jan Schomerus, Gerald Temme, George Thomaidis.

Besonders dankbar bin ich meiner Familie, die mir die notwendigen Freiräume gewährt, mich nach besten Kräften unterstützt und durchweg motiviert hat. Hier möchte ich insbesondere ein großes Dankeschön an Katrin und meine Söhne Jarne und Mattis sowie meine Eltern richten.

Christian Löper

Kurzfassung

Bei der Entwicklung des teil- und hochautomatisierten Fahrens muss neben der Betrachtung rein technischer Fragestellungen ein besonderer Fokus auf die Gestaltung des Zusammenwirkens des Fahrers mit der Automation bei der Fahraufgabenbearbeitung gelegt werden. Erfolgt keine tiefgründige Gestaltung dieses Zusammenwirkens, wird der durch die Automatisierung erhoffte Komfort- und Sicherheitsgewinn nicht erreicht und es kann außerdem zu einer Minimierung des bereits erreichten Komfort- und Sicherheitsniveaus kommen. Basierend auf der Betrachtung von bekannten Problemen beim Einsatz einer hohen Automatisierung zielt die vorliegende Arbeit daher auf eine Gestaltung einer Automation für das teil- und hochautomatisierte Fahren ab, die es ermöglicht, die Probleme im Zusammenwirken von Mensch und Automation zu minimieren oder zu vermeiden und einen signifikanten Komfort- und Sicherheitsgewinn zu erreichen.

Der Ansatz der vorliegenden Arbeit zur Erreichung dieser Zielsetzung ist die kooperative Gestaltung des Zusammenwirkens von Fahrer und Automation, die daher kooperative Automation genannt wird. Dazu erfolgt eine ausführliche Auseinandersetzung mit der Idee der kooperativen Automation für das teil- und hochautomatisierte Fahren aus ingenieurwissenschaftlicher Perspektive. Dies umfasst die detaillierte Darstellung des allgemeinen Konzeptes, die darauf aufbauende technische Konkretisierung, die Beschreibung von Ansätzen zur technischen Umsetzung sowie eine ausführliche Evaluierung. Kernelemente des Konzeptes sind die gemeinsame Handlungsplanung und -ausführung sowie die Kompatibilität von Automation und Fahrer. Die Kompatibilität beschreibt die Passung der Automation mit dem Fahrer, wodurch ein hohes Verständnis des Fahrers für die Aktionen der Automation erreicht werden kann und damit die Kooperation erst ermöglicht wird. Eine exponierte Stellung nimmt die Strukturierung des Fahrtablaufes in einzelne Manöver ein.

Der Fokus dieser Arbeit liegt auf der Automationsfunktionalität. Daher ist die Zielsetzung hinsichtlich der Mensch-Maschine-Schnittstelle die Beschreibung von Konzepten und Methoden zur Bereitstellung verschiedenster Kommunikationsmöglichkeiten, nicht die Beschreibung der konkreten Ausgestaltung der Schnittstelle. Da die konkrete Ausgestaltung der Mensch-Maschine-Schnittstelle einen erheblichen Einfluss auf die Wirkung der kooperativen Automation beim Fahrer hat, zielt die Arbeit auf die Bereitstellung eines möglichst großen positiven Wirkpotentials hinsichtlich der Vermeidung von Problemen im Zusammenwirken von Mensch und Automation und der Erreichung eines signifikanten Komfort- und Sicherheitsgewinnes ab.

Die Grundlage dieser Arbeit bildet die Ausarbeitung des allgemeinen Konzeptes der kooperativen Automation zur teil- und hochautomatisierten Fahrzeugführung mittels einer grundlegenden Definition von kooperativer Automation und der Konzipierung einzelner Kooperation ausmachender Elemente. Durch deren Ausarbeitung wird eine strukturierte Herangehensweise bei der Ausformulierung des Konzeptes erreicht und damit die Grundlage für eine systematische Anwendung des Konzeptes geschaffen.

Aufbauend auf den allgemeinen Überlegungen zum Konzept der kooperativen Automation erfolgt die technische Konkretisierung des Konzeptes, die darauf abzielt, die Grundlage zur Umsetzung ei-

ner kooperativen Automation bereitzustellen. Ein Kernaspekt ist dabei die Erarbeitung einer funktionalen Systemarchitektur.

Die Umsetzung der kooperativen Automation wird manöverbasiert konzipiert. Die Modellierung der Manöver steht daher im Zentrum des Gesamtumsetzungskonzeptes. Für die Bewältigung von Autobahnszenarien werden konkrete Manöver entworfen. Die Bearbeitungsebene Manöverplanung wird als ein Bestandteil des Gesamtkonzeptes im Detail vorgestellt. Unter Anwendung der Fuzzy Logik erfolgt hier unter anderem die Erkennung des aktuell vom Fahrzeug gefahrenen Manövers, die Bestimmung der durchführbaren Manöver sowie die Ermittlung der Präferenzen der Automation hinsichtlich des auszuführenden Manövers. Anschließend werden zur Verdeutlichung exemplarisch einige Aspekte der detaillierten Modellierung des Manövers „Fahrstreifen wechseln“ dargestellt. Bei der Konzipierung der Umsetzung steht die Realisierung des Kooperationsgedankens und seiner Teilaspekte konsequent im Fokus, um eine möglichst umfassende und zielgerichtete Umsetzung dessen zu erreichen.

Zur Erarbeitung der kooperativen Automation wurde in dieser Arbeit ein iterativer Entwicklungsprozess angewendet, in dem sich stetig Entwicklungs- und Evaluierungsphasen abwechseln. Dabei wurden sowohl Usability Untersuchungen mit Probanden als auch technische Evaluierungen unter Verwendung verschiedener Fahrsimulatoren und Versuchsfahrzeuge eingesetzt. Mittels dieser Evaluierungen kann das Wirkpotential des Konzeptes hinsichtlich der anvisierten Effekte aufgezeigt werden. Des Weiteren zeigen die Evaluierungen, dass durch die konzipierte Umsetzung eine erfolgreiche Realisierung der kooperativen Automation erreicht wurde.

Als zentrales Ergebnis der vorliegenden Arbeit lässt sich festhalten, dass eine kooperative Automation für das teil- und hochautomatisierte Fahren helfen kann, die Probleme im Zusammenwirken von Mensch und Automation zu minimieren oder zu vermeiden und einen signifikanten Komfort- und Sicherheitsgewinn zu erreichen. Da in dieser Arbeit eine ausführliche Auseinandersetzung mit der Idee der kooperativen Automation für das teil- und hochautomatisierte Fahren von der Konzeption über die Umsetzung bis hin zur Evaluierung in Fahrsimulatoren und im Versuchsfahrzeug erfolgt, ergibt sich eine hohe Aussagekraft der erzielten Ergebnisse aus ingenieurwissenschaftlicher Perspektive.

Abstract

In the development of partially, conditionally, or highly automated driving the design of the coaction of driver and the automation for the joint execution of the driving task has to be in focus especially. When no profound design of this coaction is available, the benefits sought as regards comfort and safety will not be achieved. Furthermore, it may so happen that the comfort and safety levels already achieved would be minimized. Based on the analyses of well-known problems when employing high levels of automation, the present thesis aims to design an automation for partially, conditionally, and highly automated driving, which allows for these problems in the coaction of human and automation to be minimized or avoided, and significant benefits in comfort and safety to be achieved.

To attain this objective, the approach of this thesis is the cooperative design of the coaction of driver and automation. Such automation is, hence, called cooperative automation. For this purpose, the idea of cooperative automation for partially, conditionally, and highly automated driving will be examined in detail from the perspective of engineering science. This comprises the elaboration of the general concept, the technical concretion of this concept, the development of approaches for the technical realisation, and a detailed evaluation. The core elements of the concept are the joint planning and execution of actions as well as the compatibility of automation and driver. Compatibility describes the fit of the automation with the driver, whereby a high degree of understanding of the actions of the automation is achieved by the driver. Only with this can the cooperation be enabled. Apart from that, the structuring of the whole ride in several compatible manoeuvres will occupy an important position in the present thesis.

The focus of this thesis is on the automation functionality. Therefore, the objective with regard to the human-machine interface is the development of concepts and methods for providing several communication options, not the concrete design of the interface. Because the concrete design of the human-machine interface significantly influences the effect of the cooperative automation on the driver, this thesis aims to provide the largest possible positive impact potential regarding the avoidance of problems in coaction and the achievement of benefits in comfort and safety.

The basis for this thesis is formed by developing the general concept of cooperative automation for partially, conditionally, and highly automated driving. This is done by the means of a fundamental definition of cooperative automation and the conception of several elements constituting cooperation. With this, a well-structured approach is assured for the formulation of the concept.

Based on the general thoughts about the concept of cooperative automation, the technical concretion of the concept is developed. This aims to provide a basis for a realization of cooperative automation. A core aspect is, therefore, the development of a functional system architecture for the cooperative automation.

The realization of cooperative automation is designed on the basis of manoeuvres. Hence, the modelling of the manoeuvres is the core issue of the realization concept, which is created in an object-oriented manner. For handling highway scenarios, concrete manoeuvres are designed. The processing-level manoeuvre planning is presented as an integral part of the overall concept in detail. By employing the fuzzy logic at this level, the recognition of the currently driven manoeuvre by

the vehicle as well as the determination of the manoeuvres feasible for automation, and preferred by the automation are carried out. Thereafter, some aspects of the detailed modelling of the manoeuvre ‘change lane’ are exemplarily presented. When developing the concepts and methods for the realization of cooperative automation, the application of the idea of cooperation and its partial aspects is consequently in focus.

In the development of cooperative automation, an iterative process was employed. Within this process, development and evaluation phases alternate. A large number of usability assessments with test persons and technical evaluations was thereby carried out, using various driving simulators and test vehicles. With these evaluations, the impact potential of the concept, with regard to the minimization of problems in the coaction of humans and automation as well as the achievement of significant benefits in comfort and safety, can be depicted. Furthermore, the evaluation results show that the cooperative automation could be successfully realized.

The core result of the present thesis is that a cooperative automation for partially, conditionally, and highly automated driving can help minimize or avoid the problems in the coaction of human and automation as well as achieve significant benefits in comfort and safety. Since a detailed examination of the idea of cooperative automation is undertaken in this thesis with conception, realization, and evaluation in driving simulators and test vehicles, a high significance of the results obtained is achieved from the perspective of engineering science.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort des Autors	I
Kurzfassung	II
Abstract	IV
Abbildungsverzeichnis	X
Tabellenverzeichnis	XIV
Definitionsverzeichnis	XVI
Symbolverzeichnis	XVII
1 Einleitung	1
1.1 Entwicklung zum teil- und hochautomatisierten Fahren	1
1.2 Probleme im Zusammenwirken von Mensch und Automation bei automatisierten Systemen	2
1.3 Ansatz der Arbeit	4
1.4 Fragestellungen, Zielsetzung und Beitrag der Arbeit	5
1.5 Vorgehensweise und Gliederung der Arbeit	8
2 Stand der Technik	11
2.1 Konzepte zur Gestaltung des Zusammenwirkens von Mensch und Automation	11
2.2 Assistenz und Automation im Fahrzeug	18
2.2.1 Fahrerassistenzsysteme	19
2.2.2 Vollautomation	23
2.2.3 Teil- und hochautomatisiertes Fahren	27
3 Konzept der kooperativen Automation zur teil- und hochautomatisierten Fahrzeugführung	33
3.1 Definition	33
3.2 Kooperation ausmachende Elemente	34
3.2.1 Kompatibilität	35
3.2.2 Gemeinsame Handlungsplanung	37
3.2.3 Gemeinsame Handlungsausführung	38
3.2.4 Gemeinsame Weiterentwicklung der Ziele und Werte sowie gemeinsamer Aufbau des Situationsbewusstseins	39
3.2.5 Mentale Modelle	40

3.2.6	Kommunikation	41
3.2.7	Rolle und Entscheidungsspielraum	42
3.2.8	Zustandsüberwachung	43
3.3	Abstrakte Bewertung des Potentials des Konzeptes	44
3.4	Zusammenfassung des Kapitels	46
4	Technische Konkretisierung der kooperativen Automation	49
4.1	Das Valentalkonzept für die gemeinsame Handlungsplanung	49
4.2	Entwurf einer funktionalen Systemarchitektur für die kooperative Automation	54
4.2.1	Modell der manuellen Fahrzeugführungsaufgabe	54
4.2.2	Funktionale Systemarchitektur der kooperativen Automation	59
4.3	Repräsentationen des Automationsverhaltens für die Kooperation mit dem Fahrer..	65
4.3.1	Manöverplanung: Manöverbaum	65
4.3.2	(Kurzzeit-) Trajektorienplanung: Trajektorienvalentiafeld	67
4.3.3	Steuerung / Regelung: Stellaktionsvalentiafeld	67
4.3.4	Zusammenhang der Repräsentationen	68
4.4	Entwicklung kompatibler Ziele, Werte und Methoden für die kooperative Automation	69
4.5	Zusammenfassung des Kapitels	72
5	Manöverbasierte Umsetzung der kooperativen Automation	75
5.1	Objektorientierte Modellierung der Manöver	76
5.1.1	Attribute der Manöverklassen	77
5.1.2	Operationen der Manöverklassen	80
5.1.3	Definition kompatibler Manöver für die Autobahnfahrt	83
5.2	Einbettung der Manöver in den weiteren objektorientierten Softwareentwurf	87
5.3	Softwareablauf der manöverbasierten Umsetzung der kooperativen Automation	93
5.4	Zusammenfassung des Kapitels	98
6	Umsetzung der Bearbeitungsebene Manöverplanung der kooperativen Automation	101
6.1	Aufbau des Manöverbaumes	103
6.1.1	Auswahl der Fuzzy Logik als Methode	103
6.1.2	Bestimmung der durchführbaren Manöver	106
6.1.3	Bestimmung der Valentiale der durchführbaren Manöver	111
6.1.4	Erkennung des wahrscheinlich aktuell vom Fahrzeug gefahrenen Manövers	116
6.1.5	Zusammensetzen des Manöverbaumes	118
6.1.6	Berücksichtigung der Entscheidungshysterese	119
6.1.7	Funktionale Sicherheit beim Aufbau des Manöverbaumes	120
6.2	Berücksichtigung des Entscheidungsspielraumes	122
6.3	Ermöglichung der gemeinsamen Manöverplanung mittels impliziter Kommunikation	123
6.4	Ermöglichung der gemeinsamen Manöverplanung mittels expliziter Kommunikation	126

6.5	Zusammenfassung des Kapitels.....	131
7	Modellierung des Manövers „Fahrstreifen wechseln“	133
7.1	Definition des Manövers	133
7.2	Elemente der Modellierung des Manövers auf der Bearbeitungsebene Manöver- planung.....	135
7.2.1	Ausprägungen und Phasen	135
7.2.2	Anlässe	135
7.3	Umsetzung der Fähigkeiten zur Manöverplanung mittels Fuzzy Logik.....	137
7.3.1	Bestimmung der Wahrscheinlichkeit aktuell gefahrenes Manöver	137
7.3.2	Bestimmung der Durchführbarkeit	140
7.4	Anforderungen an einen Trajektorienplanungsalgorithmus	144
7.5	Zusammenfassung des Kapitels.....	146
8	Entwicklungsprozess und Evaluierungen der kooperativen Automation	149
8.1	Entwicklungsprozess und Gesamtübersicht der durchgeführten Evaluierungen	150
8.1.1	Entwicklungsphase	151
8.1.2	Evaluierungsphase	152
8.1.3	Abschluss des Entwicklungsprozesses	156
8.1.4	Übersicht und Gesamtbetrachtung der durchgeführten Evaluierungen	158
8.2	Ergebnisse einer ausgewählten technischen Evaluierung	161
8.2.1	Fahrstreifenwechsel mit freiem Grundfahrstreifen	162
8.2.2	Fahrstreifenwechsel mit durch ein Objekt versperrtem Grundfahrstreifen ...	165
8.2.3	Fazit	167
8.3	Ergebnisse aus Usability Untersuchungen mit Probanden.....	168
8.3.1	Beispielstudie 1: Plötzlich auftauchendes Vorderfahrzeug (Festsitzsimu- lator des IDeELab).....	170
8.3.2	Beispielstudie 2: Allgemeines Fahren auf der Autobahn mit manueller Übernahme der Kontrolle (Festsitzsimulator des IDeELab).....	176
8.3.3	Beispielstudie 3: Fahrstreifenwechsel und manuelle Übernahme der Kon- trolle (Versuchsfahrzeug FASCar II)	181
8.4	Zusammenfassung des Kapitels.....	188
9	Zusammenfassung, Diskussion und Ausblick	193
9.1	Zusammenfassung und Diskussion	193
9.2	Ausblick	198
Anhang		203
A	Fuzzy Logik und andere zur Manöverplanung geeignete Methoden	203
A.1	Fuzzy Logik	203
A.2	Übersicht zur Manöverplanung geeigneter Methoden.....	205

B	Übersicht der für die Evaluierungen eingesetzten Versuchsplattformen und der Projektbezüge	207
B.1	Eingesetzte Versuchsplattformen	207
B.2	Projektbezüge der Evaluierungen.....	209
C	Übersicht der in den einzelnen Abschnitten adressierten Kooperation ausmachenden Elemente	213
	Literaturverzeichnis	217

Abbildungsverzeichnis

1.1	Fahrer und kooperative Automation arbeiten „Hand in Hand“ zusammen bei der Fahrzeugführung	5
1.2	Automationsfunktionalität als Fokus der vorliegenden Arbeit im betrachteten Gesamtsystem aus Fahrer, kooperativer Automation und Fahrzeug in der Umgebung..	6
1.3	Zentrale Fragestellungen und einzelne Bestandteile der Arbeit sowie die im Drei-Ebenen-Modell der Fahrzeugführungsaufgabe nach Donges [47, S. 184] adressierten Ebenen.....	7
1.4	In dieser Arbeit angewendete Vorgehensweise mit Benennung der in den Arbeitsschritten adressierten Forschungsfragen und Zuordnung der Arbeitsschritte zu Kapiteln.....	9
3.1	Fahrer und Automation führen gemeinsam das Fahrzeug in der Umwelt (nach Flemisch et al. [69]).....	34
3.2	Übersicht der Kooperation ausmachenden Elemente	34
3.3	Kompatibilität von Stecker und Steckdose	36
3.4	Äußere Kompatibilität am Beispiel von Computermouse und Hand	36
3.5	Kognitive Kompatibilität als Teil der inneren Kompatibilität	36
3.6	Implizite und explizite Kommunikation (Darstellung basiert auf Flemisch et al. [69]).....	42
4.1	Dreidimensionale Visualisierung des Valentiales in Abhängigkeit der Durchführbarkeit und des relativen Wertes mit unterschiedlicher Risikobereitschaft (Links: $r = 0, 25$, Rechts: $r = 0, 5$)	52
4.2	Schnitte durch die Valentiaalfunktion für verschiedene relative Werte und Durchführbarkeiten mit unterschiedlicher Risikobereitschaft (Links: $r = 0, 25$, Rechts: $r = 0, 5$)	52
4.3	Modell des menschlichen Verhaltens bei Ausführung von zielgerichteten sensu-motorischen Tätigkeiten nach Rasmussen [167]	55
4.4	Drei-Ebenen-Modell der Fahrzeugführungsaufgabe nach Donges [47, S. 184]	56
4.5	Kombiniertes Vier-Stufen- und Vier-Ebenen-Modell der manuellen Fahrzeugführungsaufgabe	57
4.6	Modell der Aufgaben des Fahrers, funktionale Systemarchitektur der kooperativen Automation und gemeinsam geführtes Fahrzeug in der Umwelt	60
4.7	Beispielsituation und zugehöriger beispielhafter Manöverbaum (die farbliche Kennzeichnung der Manöver dient der Verdeutlichung ihrer Verbindung zu Trajektorienvallentiaalfeld und Stellaktionsvallentiaalfeld, die in den Abbildungen 4.9 und 4.10 gezeigt werden und über analoge Kennzeichnungen verfügen)	66

4.8	Zum beispielhaften Manöverbaum (Abbildung 4.7) analoge Manöverfolgen (die farbliche Kennzeichnung der Manöver dient der Verdeutlichung ihrer Verbindung zu Manöverbaum, Trajektorienvallentiafeld und Stellaktionsvallentiafeld, die in den Abbildungen 4.7, 4.9 und 4.10 gezeigt werden)	67
4.9	Beispielhaftes Trajektorienvallentiafeld (die farbliche Kennzeichnung der Trajektorien zeigt die Zuordnung zur jeweiligen im Manöverbaum in Abbildung 4.7 enthaltenen Manöverfolge)	67
4.10	Beispielhaftes Stellaktionsvallentiafeld (die farbliche Kennzeichnung der Stellaktionspunkte zeigt die Zuordnung zu den im Manöverbaum in Abbildung 4.7 enthaltenen aktuell durchführbaren Manövern)	68
4.11	Übersicht der Vorgehensweise zur Entwicklung kompatibler Ziele, Werte und Methoden	70
5.1	Bearbeitungsstufen und -ebenen der funktionalen Systemarchitektur für die kooperative Automation, deren Umsetzung Gegenstand von Kapitel 5 ist	75
5.2	Klassenhierarchie der Manöverklassen	77
5.3	Für das Autobahnszenario modellierte Manöver der kooperativen Automation	84
5.4	Einbettung der Manöverklassen in den weiteren objektorientierten Softwareentwurf	87
5.5	Relevante Situationsmerkmalsobjekte für das Autobahnszenario (zur Definition der Bezeichnungen siehe Tabelle 5.4)	88
5.6	Übersicht des Softwareablaufes der manöverbasierten Umsetzung der kooperativen Automation	94
6.1	Aufbau der Umsetzung der Bearbeitungsebene Manöverplanung der kooperativen Automation	102
6.2	Bezug der Funktionsblöcke auf der Bearbeitungsebene Manöverplanung (siehe Abbildung 6.1) zum entworfenen Softwareablauf (siehe Abbildung 5.6)	102
6.3	Aufbau des Manöverbaumes	103
6.4	Bestimmung der durchführbaren Manöver $M_{d,Bi}$ eines mit dem Manöverbegriff Bi bezeichneten Manövers	108
6.5	Bestimmung der Vallentiale der durchführbaren Manöver	111
6.6	Zugehörigkeitsfunktionen des relativen Wertes von Manöver 2 bezüglich Manöver 1 und Defuzzifizierung anhand eines Zahlenbeispiels	113
6.7	Erkennung des wahrscheinlich aktuell vom Fahrzeug gefahrenen Manövers	116
6.8	Zusammensetzen des Manöverbaumes $\mathbf{M}_{Automation}$	118
6.9	Berücksichtigung des Entscheidungsspielraumes mittels beispielhafter Manöverbäume: Aufgrund der dargestellten Initiativwerte wird das von der Automation beabsichtigt auszuführende Manöver ausgewählt	122
6.10	Ermöglichung der gemeinsamen Manöverplanung mittels impliziter Kommunikation: Das Manöver $m_{aktuell}$ wird als das von der Automation beabsichtigt auszuführende Manöver im Manöverbaum $\mathbf{M}_{Automation+}$ ausgewählt.	124
6.11	Beispielsequenz für die gemeinsame Manöverplanung mittels impliziter Kommunikation	125

6.12	Ermöglichung der gemeinsamen Manöverplanung mittels expliziter Kommunikation: Das Manöver m_{Folge1} wird aufgrund des während der Verhandlung mittels der Interaktionsumsetzung festgestellten gemeinsamen Willens von Automation und Fahrer zum von der Automation ausgeführten Manöver in $\mathbf{M}_{\text{Kooperation}}$ 127	127
6.13	Flussdiagramm des Schrittes „Ermöglichung der gemeinsamen Manöverplanung mittels expliziter Kommunikation“ 128	128
6.14	Beispielsequenz für die gemeinsame Manöverplanung mittels expliziter Kommunikation 130	130
7.1	Manöver „Fahrstreifen wechseln“ 134	134
7.2	Anlässe des Manövers „Fahrstreifen wechseln“ 136	136
7.3	Exemplarischer Verlauf der Position, der lateralen Abweichung vom aktuellen Fahrstreifen Δy_F (zunächst Startfahrstreifen, nach dem Übertritt der Fahrstreifenmarkierung Zielfahrstreifen) und des Gierwinkels relativ zu den Fahrstreifen $\Delta \psi_F$ für einen Fahrstreifenwechsel nach links 138	138
7.4	Zugehörigkeitsfunktionen der linguistischen Werte für $t_{\text{letzter_Aufenthalt}}$, Δy_F , $\Delta \psi_F$ 139	139
7.5	Zugehörigkeitsfunktionen der linguistischen Werte für t_{HW} und t_{TC} zu Fahrzeugen auf den Nachbarfahrstreifen 144	144
8.1	Automationsfunktionalität als Fokus der vorliegenden Arbeit und der Evaluierungen (basierend auf den Abbildungen 1.2 und 5.1). In den Evaluierungen werden jeweils verschiedene Interaktionsumsetzungen und Versuchsplattformen genutzt.... 150	150
8.2	Iterativer Entwicklungsprozess mit Benennung der in den Arbeitsschritten adressierten Forschungsfragen und Zuordnung der Arbeitsschritte zu den Kapiteln dieser Arbeit 151	151
8.3	Versuchsfahrzeug FASCar II während einer Versuchsfahrt aus der ausgewählten technischen Evaluierung 161	161
8.4	Ausgewählte Ergebnisse der Versuchsfahrt zur Durchführung von Fahrstreifenwechseln mit freiem Grundfahrstreifen 163	163
8.5	Manöverbäume $\mathbf{M}_{\text{Automation+}}$ und $\mathbf{M}_{\text{Kooperation}}$ bei $t = 1,5$ s während der Versuchsfahrt zur Durchführung von Fahrstreifenwechseln mit freiem Grundfahrstreifen 164	164
8.6	Ausgewählte Ergebnisse der Versuchsfahrt zur Durchführung von Fahrstreifenwechseln mit durch ein Objekt versperrtem Grundfahrstreifen 166	166
8.7	Beispielstudie 1: Proband im Festsitzsimulator des IDeELab während der Studie, Situation mit Fahrstreifenwechselmöglichkeit und Situation ohne Fahrstreifenwechselmöglichkeit 170	170
8.8	Beispielstudie 1: Übersicht des Studienablaufes 173	173
8.9	Beispielstudie 1: Mittelwerte der Antworten der Probanden hinsichtlich der Fragen 1 bis 3. Die Fehlerbalken stellen die Standardfehler des Mittelwertes dar. 174	174
8.10	Beispielstudie 1: Mittelwerte der Antworten der Probanden hinsichtlich der Fragen 4 bis 7. Die Fehlerbalken stellen die Standardfehler des Mittelwertes dar. 174	174

8.11	Beispielstudie 1: Mittelwerte der Reaktionszeiten der Probanden bei plötzlich auftauchendem Vorderfahrzeug in der hoch kritischen Situation. Die Fehlerbalken stellen die Standardfehler des Mittelwertes dar.	175
8.12	Beispielstudie 2: Proband im Festsitzsimulator des IDeELab während der Studie ...	176
8.13	Beispielstudie 2: Übersicht des Studienablaufes	178
8.14	Beispielstudie 2: Mittelwerte der Bewertungen der Probanden der Aussagen 1 bis 8 für die vollständige erste und zweite Fahrt. Die Fehlerbalken stellen die Standardfehler des Mittelwertes dar.	179
8.15	Beispielstudie 2: Mittelwerte der Bewertungen der Probanden der Aussagen 9 bis 11 für das Übernehmen der Kontrolle und den hochautomatisierten Fahrstreifenwechsel. Die Fehlerbalken stellen die Standardfehler des Mittelwertes dar.	180
8.16	Beispielstudie 2: Mittelwerte der Bewertungen der Probanden der Aussagen 12 bis 15 nach dem Absolvieren sämtlicher Fahrten. Die Fehlerbalken stellen die Standardfehler des Mittelwertes dar.	181
8.17	Beispielstudie 3: Proband im Versuchsfahrzeug FASCar II während der Studie	182
8.18	Beispielstudie 3: Übersicht des Studienablaufes	185
8.19	Beispielstudie 3: Mittelwerte der Antworten der Probanden hinsichtlich der Fragen 1 bis 3 und 6. Die Fehlerbalken stellen die Standardfehler des Mittelwertes dar.	186
8.20	Beispielstudie 3: Mittelwerte der Antworten der Probanden hinsichtlich der Fragen 5 bis 7. Die Fehlerbalken stellen die Standardfehler des Mittelwertes dar.	186
8.21	Beispielstudie 3: Gefahrene Bahnen der Probanden bei manueller Übernahme der Kontrolle vor dem durch die kooperative Automation nicht zu erkennenden Hindernis	187
A.1	Anwendungsbeispiel der Fuzzy Logik	205
B.1	Festsitzsimulator des IDeELab	208
B.2	Dynamischer Fahrsimulator	208
B.3	FASCar I	209
B.4	FASCar II	209

Tabellenverzeichnis

1.1	Definition von Automatisierungsgraden der Bundesanstalt für Straßenwesen [74] ..	3
3.1	Abstrakte Bewertung des potentiellen Beitrages der Kooperation ausmachenden Elemente zum durch die Automation bewirkten Gewinn (+: potentieller Beitrag, ++: besonders hoher potentieller Beitrag)	45
3.2	Kurzzusammenfassung von Kapitel 3	47
4.1	Durch die technische Konkretisierung adressierte Kooperation ausmachende Elemente	50
4.2	Zahlenbeispiel zur Valentialberechnung für drei durchführbare Handlungen und drei verschiedene Risikobereitschaften (das Valential der präferierten Handlung ist jeweils durch eine fette Schriftstärke markiert)	53
4.3	Kurzzusammenfassung von Kapitel 4	73
5.1	Attribute der Manöverklassen	78
5.2	Operationen der Manöverklassen	81
5.3	Überprüfung des durch die definierten Manöver umfassten Verhaltens- und Situationsumfanges anhand des durch den von Nagel definierten Manöverkatalog umfassten Verhaltens- und Situationsumfanges	86
5.4	Bezeichnungen der relevanten Situationsmerkmalsobjekte für das Autobahnszenario	88
5.5	Ausgewählte relevante Situationsmerkmale für das Autobahnszenario	89
5.6	Ausgewählte Fahrstilparameter der Automation aus $P_{F, Automation}^{allgemein}$ für das Autobahnszenario	90
5.7	Ausgewählte Fahrstilparameter der Interaktionsumsetzung aus $P_{F, Interaktion}^{allgemein}$ für das Autobahnszenario	91
5.8	Wichtige Operationen der Manövermenge	91
5.9	Wichtige Operationen des Manöverbaumes	92
5.10	Kurzzusammenfassung von Kapitel 5	100
6.1	Anforderungen an die für die Manöverplanung genutzte Methode und Bewertung von ausgewählten Methoden anhand dieser Anforderungen (0: nicht oder nur schwer erfüllbare Anforderung, +: erfüllbare Anforderung, ++: sehr gut erfüllbare Anforderung) (1/2)	105
6.2	Anforderungen an die für die Manöverplanung genutzte Methode und Bewertung von ausgewählten Methoden anhand dieser Anforderungen (0: nicht oder nur schwer erfüllbare Anforderung, +: erfüllbare Anforderung, ++: sehr gut erfüllbare Anforderung) (2/2)	106
6.3	Bedeutung der relativen Werte $w_{2,1}$ und $w_{1,2}$	113
6.4	Kurzzusammenfassung von Kapitel 6	132
7.1	Elemente der Modellierung des Manövers „Fahrstreifen wechseln“ auf der Bearbeitungsebene Manöverplanung	135

7.2	Übersicht der in den Regeln zur Bestimmung der Wahrscheinlichkeit mit der das Manöver „Fahrstreifen wechseln“ als aktuell gefahrenes infrage kommt verwendeten Variablen	138
7.3	Übersicht der in den Regeln zur Bestimmung der Durchführbarkeit des Manövers „Fahrstreifen wechseln“ verwendeten Variablen.....	141
7.4	Kurzzusammenfassung von Kapitel 7	148
8.1	Übersicht der mit der kooperativen Automation durchgeführten technischen Evaluierungen, Usability Untersuchungen mit Probanden und öffentlichen Demonstrationen (Beschreibung der Versuchsplattformen und Projekte siehe Anhang B, für die durch eine fette Schriftstärke markierten Evaluierungen folgt eine detaillierte Beschreibung in diesem Kapitel).....	160
8.2	Konkrete Fragestellungen für die Auswertung der Usability Untersuchungen und Übersicht der bei der Auswertung der jeweiligen Untersuchung besonders adressierten Fragestellungen.....	169
8.3	Kurzübersicht zu Beispielstudie 1: Plötzlich auftauchendes Vorderfahrzeug.....	171
8.4	Beispielstudie 1: Übersicht der Studienszenarien	172
8.5	Kurzübersicht zu Beispielstudie 2: Allgemeines Fahren auf der Autobahn	177
8.6	Kurzübersicht zu Beispielstudie 3: Fahrstreifenwechsel und manuelle Übernahme der Kontrolle.....	182
8.7	Kurzzusammenfassung von Kapitel 8	191
C.1	Übersicht der in den einzelnen Abschnitten der Arbeit adressierten Kooperation ausmachenden Elemente.....	215

Definitionsverzeichnis

4.1	Manöverbegriff.....	58
4.2	Von der Automation durchführbares Manöver	61
4.3	Von der Automation ausgeführtes Manöver	62
4.4	Vom Fahrzeug aktuell gefahrenes Manöver.....	62
7.1	Fuzzy Operatoren \neg und „ ODER_{BS} “	142
A.1	Fuzzy Operatoren „UND“ und „ODER“	204

Symbolverzeichnis

Symbol	Bedeutung	Einheit
Manöverobjekte, Manövermengen, Manöverbäume		
m	Manöverobjekt	-
M	Manöverobjektmenge	-
\mathbf{M}	Manöverbaum (beinhaltet Manöverobjekte)	-
M_{Basis}	Manöverbasismenge	-
m_{Basis}	Basismanöverobjekt	-
n_M	Anzahl der in der Manöverbasismenge enthaltenen Basismanöverobjekte	1
$m_{aktuell}$	Wahrscheinlich aktuell vom Fahrzeug gefahrenes Manöver	-
$M_{durchführbar}$	Von der Automation durchführbare Manöver	-
$n_{durchführbar}$	Anzahl der in der Menge $M_{durchführbar}$ enthaltenen Manöverobjekte	1
$\mathbf{M}_{Automation}$	Manöverbaum der Automation	-
$\mathbf{M}_{Automation,alt}$	Manöverbaum der Automation aus dem letzten Rechenzyklus	-
$\mathbf{M}_{Automation+}$	Manöverbaum der Automation mit berücksichtigter impliziter Kommunikation	-
$\mathbf{M}_{Interaktion}$	Von der Interaktionsumsetzung als Ergebnis der Kommunikation mit dem Fahrer ermittelter Manöverbaum	-
$\mathbf{M}_{Kooperation}$	Ergebnismanöverbaum der kooperativen Manöverplanung	-
$m_{sicherer_Zustand}$	Manöver, welches das Fahrzeug jederzeit möglichst schnell in einen sicheren Zustand bringt	-
Trajektorien, Trajektorienventialfelder		
Θ	Trajektorie	-
\mathbf{T}	Trajektorienventialfeld (beinhaltet Trajektorien)	-
$\mathbf{T}_{Kooperation}$	Trajektorienventialfeld basierend auf $\mathbf{M}_{Kooperation}$	-

Symbol	Bedeutung	Einheit
Stellaktionspunkte, Kontrollanteile		
Γ	Stellaktionspunkt	-
$\mathbf{S}_{\text{Kooperation}}$	Stellaktionsvalentialfeld basierend auf $\mathbf{M}_{\text{Kooperation}}$	-
\mathbf{S}	Stellaktionsvalentialfeld (beinhaltet Stellaktionspunkte)	-
δ_{norm}	normierter Lenkwinkel ($-1 \leq \delta_{\text{norm}} \leq 1$)	1
η_{norm}	positiv: normierte Beschleunigungsanforderung an den Antriebsstrang ($0 \leq \eta_{\text{norm}} \leq 1$), negativ: normierter Bremsdruck ($-1 \leq \eta_{\text{norm}} \leq 0$)	1
$\delta_{\text{norm}}^{\text{Interaktion}}$	Von der Interaktionsumsetzung ermittelter normierter Lenkwinkel	1
$\eta_{\text{norm}}^{\text{Interaktion}}$	Von der Interaktionsumsetzung ermittelte normierte Beschleunigungsanforderung an den Antriebsstrang / ermittelter normierter Bremsdruck	1
$\delta_{\text{norm}}^{\text{Fahrzeug}}$	An die Fahrzeugaktorik übermittelter normierter Soll-Lenkwinkel	1
$\eta_{\text{norm}}^{\text{Fahrzeug}}$	An die Fahrzeugaktorik übermittelte normierte Soll-Beschleunigungsanforderung an den Antriebsstrang / übermittelter normierter Soll-Bremsdruck	1
$\lambda_{\eta}^{\text{Interaktion}}$	Von der Interaktionsumsetzung wahrgenommener Kontrollanteil in Längsrichtung ($0 \leq \lambda_{\eta}^{\text{Interaktion}} \leq 1$)	1
$\lambda_{\delta}^{\text{Interaktion}}$	Von der Interaktionsumsetzung wahrgenommener Kontrollanteil in Querrichtung ($0 \leq \lambda_{\delta}^{\text{Interaktion}} \leq 1$)	1
$\lambda_{\eta}^{\text{Automation}}$	Direkter Kontrollanteil der Automation in Längsrichtung ($\lambda_{\eta}^{\text{Automation}} = 1 - \lambda_{\eta}^{\text{Interaktion}}$, $0 \leq \lambda_{\eta}^{\text{Automation}} \leq 1$)	1
$\lambda_{\delta}^{\text{Automation}}$	Direkter Kontrollanteil der Automation in Querrichtung ($\lambda_{\delta}^{\text{Automation}} = 1 - \lambda_{\delta}^{\text{Interaktion}}$, $0 \leq \lambda_{\delta}^{\text{Automation}} \leq 1$)	1
Berechnung des Valentiales und Wertes		
v	Valential ($v \in [0, 1]$)	1
d	Durchführbarkeit ($d \in [0, 1]$)	1
d_{\min}	Ein Manöver ist durchführbar, wenn die Durchführbarkeit größer als d_{\min} ist.	1
r	Risikobereitschaft	1
β	Verhandlungsbereitschaft ($\beta \in [0, 1]$)	1

Symbol	Bedeutung	Einheit
$w_{2,1}$	Relativer Wert von Manöver 2 bezüglich Manöver 1 ($w_{2,1} \in [0, 1]$)	1
$w_{1,2}$	Relativer Wert von Manöver 1 bezüglich Manöver 2 ($w_{1,2} \in [0, 1]$)	1
Attribute zur Beschreibung der Manöver		
B	Manöverbegriff	-
α	Ausprägung	1
a	Anlass	1
a_I	Intensität des Anlasses	1
p	Phase	1
i	Initiativwert	1
d	Durchführbarkeit	1
w_{rel}	Relativer Wert	1
v	Valential	1
$w_{aktuell}$	Wahrscheinlichkeit aktuell gefahrenes Manöver	1
P_B	Beschreibungsparameter	-
$P_{F, Automation}^m$	Fahrstilparameter der Automation	-
$P_{F, Interaktion}^m$	Fahrstilparameter der Interaktionsumsetzung	-
Θ_{\rightarrow}	Verbindung zur Trajektorie	-
Γ_{\rightarrow}	Verbindung zum Stellaktionspunkt	-
b	Bezeichner	1
Situationsmerkmalsobjekte		
SM	Gesamtheit der relevanten Situationsmerkmale	-
SM^L	Gesamtheit der linguistischen relevanten Situationsmerkmale	-
STL	Situationsmerkmalsobjekt Fahrstreifen links	-
STA	Situationsmerkmalsobjekt aktueller Fahrstreifen	-
STR	Situationsmerkmalsobjekt Fahrstreifen rechts	-
FVL	Situationsmerkmalsobjekt Fahrzeug vorne links	-
FV	Situationsmerkmalsobjekt Fahrzeug vorne	-

Symbol	Bedeutung	Einheit
FVR	Situationsmerkmalsobjekt Fahrzeug vorne rechts	-
FSL	Situationsmerkmalsobjekt Fahrzeug seitlich links	-
FSR	Situationsmerkmalsobjekt Fahrzeug seitlich rechts	-
FHL	Situationsmerkmalsobjekt Fahrzeug hinten links	-
FH	Situationsmerkmalsobjekt Fahrzeug hinten	-
FHR	Situationsmerkmalsobjekt Fahrzeug hinten rechts	-
EF	Situationsmerkmalsobjekt Eigenfahrzeug	-
Situationsmerkmale eines Fahrstreifens		
\exists	Existenz des Fahrstreifens	1
Δy_F	Laterale Abweichung der Eigenfahrzeugmitte von der Fahrstreifenmitte	m
Δy_F^L	Linguistische Variable zu Δy_F	1
$\Delta \psi_F$	Gierwinkelabweichung von der Tangente an den Fahrstreifen	rad
$\Delta \psi_F^L$	Linguistische Variable zu $\Delta \psi_F$	1
t_{LC}	Zeit bis zum Überschreiten der Fahrstreifenbegrenzung (Time to Line Crossing)	s
t_{LC}^L	Linguistische Variable zu t_{LC}	1
$t_{\text{letzter_Aufenthalt}}$	Zeit seit letztem Aufenthalt auf dem Fahrstreifen	s
$t_{\text{letzter_Aufenthalt}}^L$	Linguistische Variable zu $t_{\text{letzter_Aufenthalt}}$	1
Δs_{Ende}	Distanz bis zum Ende des Fahrstreifens	m
Δs_{Ende}^L	Linguistische Variable zu Δs_{Ende}	1
v_{limit}	Geschwindigkeitsbegrenzung	$\frac{\text{m}}{\text{s}}$
c_F	Typ des Fahrstreifens	1
c_{FMI}	Typ der linken Fahrstreifenmarkierung	1
c_{FMr}	Typ der rechten Fahrstreifenmarkierung	1
Situationsmerkmale eines Fahrzeuges		
\exists	Existenz des Fahrzeuges	1
Δs	Longitudinale Distanz	m
Δs^L	Linguistische Variable zu Δs	1
t_{HW}	Zeitlücke	s

Symbol	Bedeutung	Einheit
t_{HW}^L	Linguistische Variable zu t_{HW}	1
t_{TC}	Time to Collision	s
t_{TC}^L	Linguistische Variable zu t_{TC}	1
Δv_{EF}	Longitudinale Relativgeschwindigkeit bezüglich der Eigenfahrzeuggeschwindigkeit	$\frac{m}{s}$
Δv_{EF}^L	Linguistische Variable zu Δv_{EF}	1
$\Delta y_{S,FM}$	Lateraler Abstand der seitlichen Fahrzeugkante zur Fahrstreifenmarkierung auf der zum Eigenfahrzeug zugewandten Seite	m
$\Delta y_{S,FM}^L$	Linguistische Variable zu $\Delta y_{S,FM}$	1
Fahrstilparameterobjekte		
P	Fahrstilparameter	-
$P_{F,Automation}^{allgemein}$	Allgemeine Menge der Fahrstilparameter der Automation	-
$P_{F,Interaktion}^{allgemein}$	Allgemeine Menge der Fahrstilparameter der Interaktionsumsetzung	-
Fahrstilparameter der Automation		
$v_{Ziel,pref}$	Präferierte Zielgeschwindigkeit	$\frac{m}{s}$
$v_{Ziel,max}$	Maximale Zielgeschwindigkeit	$\frac{m}{s}$
$\Delta v_{limit,max}$	Maximale Überschreitung der Geschwindigkeitsbegrenzung	$\frac{m}{s}$
Δy_{pref}	Präferierter lateraler Versatz des Eigenfahrzeuges im Fahrstreifen	m
Δy_{max}	Maximaler lateraler Versatz des Eigenfahrzeuges im Fahrstreifen	m
Δy_{min}	Minimaler lateraler Versatz des Eigenfahrzeuges im Fahrstreifen	m
$t_{HW,pref}$	Präferierte Zeitlücke zum vorausfahrenden Fahrzeug	s
$t_{HW,min}$	Minimale Zeitlücke zum vorausfahrenden Fahrzeug	s
$d_{FV,min}$	Minimaler Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug	m
$a_{y,max+}$	Maximale positive Querbeschleunigung	$\frac{m}{s^2}$
$a_{y,pref+}$	Präferierte positive Querbeschleunigung	$\frac{m}{s^2}$
$a_{y,pref-}$	Präferierte negative Querbeschleunigung	$\frac{m}{s^2}$

Symbol	Bedeutung	Einheit
$a_{y,max-}$	Maximale negative Querschleunigung	$\frac{m}{s^2}$
$a_{x,max+}$	Maximale positive Längsbeschleunigung	$\frac{m}{s^2}$
$a_{x,pref+}$	Präferierte positive Längsbeschleunigung	$\frac{m}{s^2}$
$a_{x,pref-}$	Präferierte negative Längsbeschleunigung	$\frac{m}{s^2}$
$a_{x,max-}$	Maximale negative Längsbeschleunigung	$\frac{m}{s^2}$
Fahrstilparameter der Interaktionsumsetzung		
$v_{Ziel,pref}$	Präferierte Zielgeschwindigkeit	$\frac{m}{s}$
Δy_{pref}	Präferierter lateraler Versatz des Eigenfahrzeuges im Fahrstreifen	m
$t_{HW,pref}$	Präferierte Zeitlücke zum vorausfahrenden Fahrzeug	s
$a_{y,pref+}$	Präferierte positive Querschleunigung	$\frac{m}{s^2}$
$a_{y,pref-}$	Präferierte negative Querschleunigung	$\frac{m}{s^2}$
$a_{x,pref+}$	Präferierte positive Längsbeschleunigung	$\frac{m}{s^2}$
$a_{x,pref-}$	Präferierte negative Längsbeschleunigung	$\frac{m}{s^2}$
Fuzzy Logik allgemein		
a^L	Zur scharfen Variable a zugehörige linguistische Variable	-
μ	Zugehörigkeitsgrad: Gibt an, zu welchem Grad ein Element in einer unscharfen Menge enthalten ist ($\mu \in [0, 1]$).	1
$\mu(a)$	Zugehörigkeitsfunktion zur Fuzzifizierung einer scharfen Variable	1

1 Einleitung

Die Entwicklung komplexer Assistenz- und Automationssysteme in Fahrzeugen hält neben rein technischen Fragestellungen auch die Fragestellung der Gestaltung des Zusammenwirkens des Fahrers mit einem derartigen System bereit. Je höher der durch ein System automatisierte Anteil der Fahraufgabe ist, desto schwerwiegender können die negativen Folgen einer nicht ausreichenden Betrachtung dieser Fragestellung sein. Bei einem teil- oder hochautomatisierten Fahrzeug hat die Automation die Fähigkeit, einen besonders hohen Anteil der Fahraufgabe zu übernehmen. Damit ergibt sich für das teil- und hochautomatisierte Fahren eine besondere Relevanz der Gestaltung des Zusammenwirkens von Automation und Fahrer. Die kooperative Gestaltung dieses Zusammenwirkens ist die Grundidee der in dieser Arbeit vorgestellten kooperativen Automation für das teil- und hochautomatisierte Fahren.

1.1 Entwicklung zum teil- und hochautomatisierten Fahren

Aufgrund intensiver Forschung und Entwicklung wurden in den letzten Jahrzehnten beachtliche Fortschritte auf dem Gebiet der Assistenz- und Automationssysteme in Fahrzeugen erzielt. Standen am Anfang noch einfache Funktionen, gelang zunehmend die Realisierung komplexerer Systeme. Den entwickelten Systemen liegen zwei Zielrichtungen zugrunde: Zum einen ist dies die Unterstützung des Fahrers bei der Fahrzeugführungsaufgabe und damit ein Zusammenwirken von Fahrer und System. Zum anderen zielen die Entwicklungen auf das vollautomatische Fahren ab, wobei eine Einbeziehung eines Fahrers nicht vorgesehen ist.

Durch Assistenz- und Automationssysteme zur Unterstützung des Fahrers konnte ein fortlaufender Gewinn an Komfort und Sicherheit erzielt werden. Im Laufe dieser Entwicklung ist der durch die Systeme automatisierte Anteil der Fahraufgabe kontinuierlich angestiegen. Am Beispiel der Automatisierung der Längsführungsaufgabe wird diese Entwicklung deutlich. Ein erstes System war hierbei der Tempomat, der die Fähigkeit besitzt, eine eingestellte Geschwindigkeit automatisch zu halten. Heute sind Systeme auf dem Markt erhältlich, die die gesamte Längsführungsaufgabe in einem definierten Situationsbereich automatisch übernehmen können. Der Trend geht weiter in Richtung höher automatisierter Funktionen, bei denen durch eine Automation ein weiter wachsender Anteil der Fahraufgabe übernommen werden kann.

Im Bereich der vollautomatischen Fahrzeuge konnte der durch die Automationssysteme abgedeckte Situationsumfang in verschiedenen Forschungsprojekten signifikant gesteigert werden. Waren es zuerst einfache Situationen, die automatisch bewältigt wurden, so können mittlerweile auch komplexere Szenarien unter bestimmten Randbedingungen automatisch absolviert werden. Bis zum Erreichen eines Entwicklungsstandes, der eine Markteinführung zulassen würde, ist jedoch noch ein erheblicher Forschungs- und Entwicklungsaufwand zu leisten. Dessen ungeachtet wird durch

die Entwicklungen im Bereich des vollautomatischen Fahrens der Trend zu höher automatisierten Funktionen im Fahrzeug zur Unterstützung des Fahrers weiter gefördert.

Die Entwicklung des teil- und hochautomatisierten Fahrens bedingt die Synthese der beiden Arbeitsbereiche der Assistenz- und Automationssysteme zur Unterstützung des Fahrers und der Automationssysteme für das vollautomatische Fahren. Bei teil- und hochautomatisierten Fahrzeugen verfügt die Automation über die Fähigkeiten, das Fahrzeug mindestens in bestimmten Situationen oder für einen bestimmten Zeitraum automatisch steuern zu können. Der Fahrer behält jedoch jederzeit eine ausreichende Kontrolle über das Fahrzeug und hat stets die Möglichkeit, einzugreifen oder zu übernehmen. Bei der Entwicklung teil- und hochautomatisierter Systeme ergeben sich daher sowohl Fragestellungen, die im Bereich der Assistenz und Automation zur Unterstützung des Fahrers von Bedeutung sind, als auch Fragestellungen, die im Bereich des vollautomatischen Fahrens betrachtet werden müssen.

Für die im Rahmen dieser Arbeit verwendete Definition von teil- und hochautomatisiertem Fahren wird die von der Projektgruppe der Bundesanstalt für Straßenwesen „Rechtsfolgen zunehmender Fahrzeugautomatisierung“ erarbeitete Definition von Automatisierungsgraden zugrunde gelegt. Tabelle 1.1 zeigt die in einem gemeinsamen Schlussbericht der Projektgruppe veröffentlichte Definition [74]. Die in der Tabelle gezeigte Klassifizierung der Assistenz- und Automationssysteme anhand ihres Automatisierungsgrades verdeutlicht weiter die bereits erläuterte Einordnung teil- und hochautomatisierter Systeme. Durch die dort vorgenommene Verortung derartiger Systeme zwischen dem assistierten und vollautomatisierten Bereich wird die Verbindung dieser Bereiche gebildet und somit deren Zusammenhang herausgestellt.

1.2 Probleme im Zusammenwirken von Mensch und Automation bei automatisierten Systemen

Bei der Entwicklung von Automationen, die teil- und hochautomatisiertes Fahren ermöglichen, dürfen nicht nur rein technische Anforderungen betrachtet werden. Es muss vielmehr explizit berücksichtigt werden, dass der Fahrer ein zentraler Bestandteil des Systems ist. Zentrale Aspekte sind die gezielte Gestaltung des Zusammenwirkens der Automation mit dem Fahrer sowie die fahrerangepasste Gestaltung des Automationsverhaltens. Erfolgt keine ausreichende Berücksichtigung des Fahrers bei der Systemgestaltung, besteht die Gefahr, dass der erhoffte Komfort- und Sicherheitsgewinn durch die Automatisierung nicht erreicht werden kann. Darüber hinausgehend kann es zu einer Minimierung des Komfort- und Sicherheitsniveaus durch zum Beispiel in der Interaktion des Fahrers mit der Automation begründeten Defiziten kommen. Je höher der Automatisierungsgrad ist, desto schwerwiegendere Folgen kann eine Minimierung des Sicherheitsniveaus hervorrufen.

In der Literatur werden verschiedene negative Automationseffekte beschrieben, die für eine Minimierung des Komfort- und Sicherheitsniveaus verantwortlich sein können. Eine Vielzahl von Erfahrungen stammt aus dem Bereich der Luftfahrt, da dort die Entwicklung hin zu hochautomatisierten Systemen aufgrund der einfacheren Automatisierbarkeit bereits vorweggenommen wurde. Durch die Automatisierung konnte hier ein hohes Sicherheitsniveau erreicht werden. Gleichzeitig traten jedoch neue Probleme auf, die in der Interaktion des Piloten mit den verschiedenen im Flugzeug

Nomenklatur	Beschreibung Automatisierungsgrad und Erwartung des Fahrers
Driver Only	Fahrer führt dauerhaft (während der gesamten Fahrt) die Längsführung (Beschleunigen/ Verzögern) und die Querverführung (Lenken) aus.
Assistiert	Fahrer führt dauerhaft entweder die Quer- oder die Längsführung aus. Die jeweils andere Fahraufgabe wird in gewissen Grenzen vom System ausgeführt. Der Fahrer muss das System dauerhaft überwachen. Der Fahrer muss jederzeit zur vollständigen Übernahme der Fahrzeugführung bereit sein.
Teilautomatisiert	Das System übernimmt Quer- und Längsführung (für einen gewissen Zeitraum und/ oder in spezifischen Situationen). Der Fahrer muss das System dauerhaft überwachen. Der Fahrer muss jederzeit zur vollständigen Übernahme der Fahrzeugführung bereit sein.
Hochautomatisiert	Das System übernimmt Quer- und Längsführung für einen gewissen Zeitraum in spezifischen Situationen. Der Fahrer muss das System dabei nicht dauerhaft überwachen. Bei Bedarf wird der Fahrer zur Übernahme der Fahraufgabe mit ausreichender Zeitreserve aufgefordert. Systemgrenzen werden alle vom System erkannt. Das System ist nicht in der Lage, aus jeder Ausgangssituation den risikominimalen Zustand herbeizuführen.
Vollautomatisiert	Das System übernimmt Quer- und Längsführung vollständig in einem definierten Anwendungsfall. Der Fahrer muss das System dabei nicht überwachen. Vor dem Verlassen des Anwendungsfalles fordert das System den Fahrer mit ausreichender Zeitreserve zur Übernahme der Fahraufgabe auf. Erfolgt dies nicht, wird in den risikominimalen Systemzustand zurückgeführt. Systemgrenzen werden alle vom System erkannt, das System ist in allen Situationen in der Lage, in den risikominimalen Systemzustand zurückzuführen.

Tabelle 1.1: Definition von Automatisierungsgraden der Bundesanstalt für Straßenwesen [74]

vorhandenen Automationssystemen begründet sind. Auch die Ursachen einiger Flugzeugunglücke lagen im Zusammenwirken der hohen Automatisierung mit den Piloten [213]. Einige der für diese Minimierung des Komfort- und Sicherheitsniveaus verantwortlichen negativen Automationseffekte werden im Folgenden kurz beschrieben.

Bei Analysen der Flugzeugunglücke wurden unter anderem die durch eine geringe Belastung begründete Unaufmerksamkeit der Piloten, das nicht erwartungsgemäße Verhalten der Automation für die Piloten und ein übermäßiges von den Piloten in die Automation gesetztes Vertrauen als Gründe identifiziert [213].

Ein weiterer Grund für die Probleme mit Automatisierung ist die „out-of-the-loop“ Problematik [58]. Diese Problematik kann bei dem Einsatz von Automatisierung bei verschiedensten zielgerichteten sensumotorischen Tätigkeiten, zu denen auch das Führen von Flugzeugen und Fahrzeugen gehört, beobachtet werden. Buld et al. [35] zeigen im Rahmen dieser Problematik angesiedelte Phänomene für das Führen von Fahrzeugen auf. Die „out-of-the-loop“ Problematik entsteht, wenn der Fahrer nicht mehr vollständig in den Regelkreis der Fahrzeugführung eingebunden ist, da die Automation diesen teilweise oder vollständig übernimmt. Eine Rückübernahme der Fahrzeugfüh-

rungsaufgabe durch den Fahrer im Falle eines Ausfalls der Automation oder bei Erreichen von Systemgrenzen der Automation wird so stark erschwert. Gründe für die Probleme bei der Rückübernahme liegen in der Verminderung von für die Fahrzeugführung benötigten Fähigkeiten des Fahrers und in der Verringerung des Situationsbewusstseins durch den mentalen Abstand zur Fahrzeugführungsaufgabe. Das Situationsbewusstsein umfasst die Wahrnehmung der für die Fahrzeugführung wichtigen Elemente der Situation, das Verständnis der Bedeutung dieser Elemente für die Fahrzeugführung und die Bildung einer Zusammenfassung sowie die Fähigkeit der Prädiktion eines zukünftigen Zustands der Situationselemente [57]. Ein hinreichendes Situationsbewusstsein bildet somit die Grundlage zur Erfüllung der Fahrzeugführungsaufgabe. Eine Ursache für die Probleme liegt neben dem verringerten Situationsbewusstsein auch im mangelnden Verständnis des Fahrers für die Automation. Wiener [207] beschreibt dies durch die auf die Automation bezogenen Fragen „What is it doing? Why is it doing that? What will it do next?“. Bainbridge [12] fasst die Probleme mit höherer Automatisierung unter dem Titel „Ironie der Automatisierung“ wie folgt zusammen: Durch das Übernehmen der einfachen Anteile einer Aufgabe durch die Automation wird die Bearbeitung der schwierigen Anteile der Aufgabe, die nicht automatisiert sind, für den Menschen erschwert („By taking away the easy parts of his task automation can make the difficult parts of the human operator’s task more difficult“ [12]). Norman [155] zeigt eine Richtung für die Lösung der genannten Probleme auf. Er sieht als Problem nicht den Einsatz von Automation im Allgemeinen, sondern die unangemessene Gestaltung der Automation sowie die nicht ausreichende Leistungsfähigkeit der Automation: „The problem is not that the automation is too powerful, the problem is that it is not powerful enough“ [155].

Die Betrachtung möglicher Probleme beim Einsatz einer hohen Automatisierung führt zur übergeordneten Fragestellung dieser Arbeit:

Wie kann eine Automation für das teil- und hochautomatisierte Fahren gestaltet werden, so dass die aufgezeigten Probleme im Zusammenwirken von Mensch und Automation minimiert oder vermieden werden und ein signifikanter Komfort- und Sicherheitsgewinn erreicht wird?

1.3 Ansatz der Arbeit

Der in der vorliegenden Arbeit verfolgte Ansatz zur Beantwortung der im vorigen Abschnitt aufgeworfenen Fragestellung ist die kooperative Gestaltung der Automation. Die Grundidee des Konzeptes der kooperativen Automation für die teil- und hochautomatisierte Fahrzeugführung ist, die Automation als einen eigenständigen Akteur zu betrachten, der in Kooperation mit dem Fahrer das Fahrzeug führt (siehe Abbildung 1.1). Im Mittelpunkt steht die Gestaltung des Zusammenwirkens von Fahrer und Automation als partnerschaftlicher Zusammenarbeit. Kernelemente des Konzeptes sind die gemeinsame Handlungsplanung und Handlungsausführung. Von besonderer Relevanz ist der Aspekt der Kompatibilität der Automation mit dem Fahrer. Dadurch wird die Passung der Automation mit dem Fahrer beschrieben, wodurch ein hohes Verständnis des Fahrers für die Aktionen der Automation erreicht werden kann und damit die Kooperation erst ermöglicht wird.

Eine exponierte Stellung in dieser Arbeit nimmt die Strukturierung des Fahrtablaufes in einzelne Manöver ein (zum Beispiel „Fahrstreifen folgen“ oder „Fahrzeug folgen“). Die Manöver dienen sowohl als eine Grundlage der gemeinsamen Handlungsplanung mit dem Fahrer als auch der Struk-

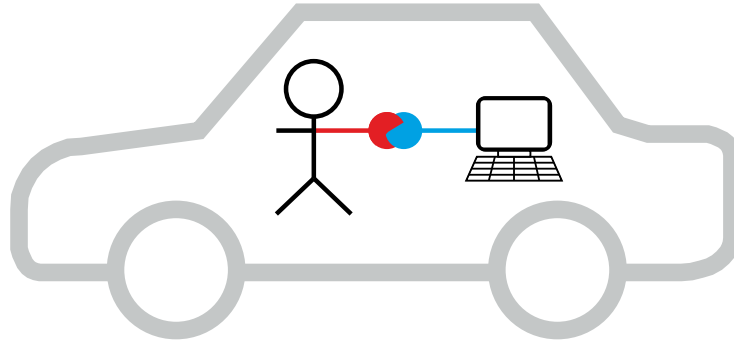


Abbildung 1.1: Fahrer und kooperative Automation arbeiten „Hand in Hand“ zusammen bei der Fahrzeugführung

turierung der Automation. Die Kompatibilität der Manöver ist für das Erreichen des kooperativen Zusammenwirkens von Automation und Fahrer von größter Bedeutung.

1.4 Fragestellungen, Zielsetzung und Beitrag der Arbeit

Der Ansatz der kooperativen Automation für das teil- und hochautomatisierte Fahren präzisiert die übergeordnete Fragestellung dieser Arbeit zu der Frage:

Kann eine kooperative Automation für das teil- und hochautomatisierte Fahren helfen, die Probleme im Zusammenwirken von Mensch und Automation zu minimieren oder zu vermeiden und einen signifikanten Komfort- und Sicherheitsgewinn zu erreichen?

Der Fokus bei der Beantwortung dieser Fragestellung wird durch die Zielsetzung der Arbeit bestimmt. Diese liegt in der ausführlichen Auseinandersetzung mit der Idee der kooperativen Automation für das teil- und hochautomatisierte Fahren aus ingenieurwissenschaftlicher Perspektive. Dies umfasst die detaillierte Darstellung des allgemeinen Konzeptes, die darauf aufbauende technische Konkretisierung dieses Konzeptes, die Beschreibung von Ansätzen zur technischen Umsetzung sowie den Nachweis der Umsetzbarkeit. Die Zielsetzung hinsichtlich der Mensch-Maschine-Schnittstelle ist die Beschreibung von Konzepten und Methoden zur Bereitstellung verschiedenster Kommunikationsmöglichkeiten, nicht die Beschreibung der konkreten Ausgestaltung der Schnittstelle. Da die konkrete Ausgestaltung der Mensch-Maschine-Schnittstelle einen erheblichen Einfluss auf die Wirkung der kooperativen Automation beim Fahrer hat, zielt die vorliegende Arbeit auf die Bereitstellung eines möglichst großen positiven Wirkpotentials hinsichtlich der Vermeidung von Problemen im Zusammenwirken von Mensch und Automation und der Erreichung eines signifikanten Komfort- und Sicherheitsgewinnes ab. Damit es seine Wirkung entfalten kann, muss dieses Potential dann von einer vorteilhaft ausgestalteten Mensch-Maschine-Schnittstelle ausgeschöpft werden. Abbildung 1.2 veranschaulicht anhand des adressierten Gesamtsystems aus Fahrer, kooperativer Automation und Fahrzeug in der Umgebung den skizzierten Fokus der Arbeit, der auf der Funktionalität der kooperativen Automation liegt.

Damit ergeben sich die von der übergeordneten Fragestellung abgeleiteten zentralen Fragestellungen der Arbeit:

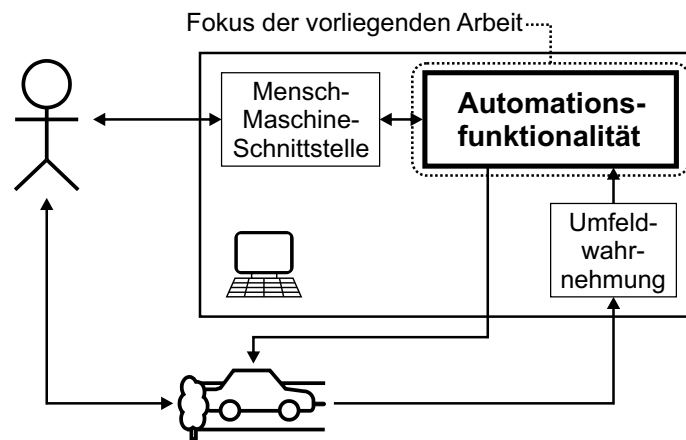


Abbildung 1.2: Automationsfunktionalität als Fokus der vorliegenden Arbeit im betrachteten Gesamtsystem aus Fahrer, kooperativer Automation und Fahrzeug in der Umgebung

Wie kann ein Konzept für eine kooperative Automation für das teil- und hochautomatisierte Fahren technisch konkret aussehen, welches das Potential aufweist, die Probleme im Zusammenwirken von Mensch und Automation zu minimieren sowie einen Komfort- und Sicherheitsgewinn zu erreichen?

Welche Konzepte und Methoden eignen sich für die technische Umsetzung der kooperativen Automation für das teil- und hochautomatisierte Fahren?

Der wissenschaftliche Beitrag der Arbeit ist kongruent zu der genannten Zielsetzung und liegt somit in der Beantwortung der aufgeführten Fragestellungen aus ingenieurwissenschaftlicher Perspektive. Im Folgenden werden die Zielsetzung und der wissenschaftliche Beitrag für die einzelnen Bestandteile der vorliegenden Arbeit detailliert dargestellt. Abbildung 1.3 zeigt den Zusammenhang der zentralen Fragestellungen zu den einzelnen Bestandteilen der Arbeit.

Die Grundlage der Arbeit bildet die Vorstellung des allgemeinen Konzeptes der kooperativen Automation für das teil- und hochautomatisierte Fahren. Die Zielsetzung ist, das Konzept gezielt für das teil- und hochautomatisierte Fahren, aber unabhängig von einer konkreten Umsetzung darzustellen. Die einzelnen in diesem Kontext Kooperation ausmachenden Elemente sollen dabei beleuchtet werden. Des Weiteren soll der Bezug des Konzeptes zu den aufgezeigten Problemen im Zusammenwirken von Mensch und Automation deutlich gemacht werden. Die Neuheit liegt in der ausführlichen Darstellung des Konzeptes und seiner einzelnen Bestandteile.

Aufbauend auf den allgemeinen Überlegungen zum Konzept der kooperativen Automation soll das Automationskonzept technisch konkretisiert werden. Der Beitrag dieses Abschnittes der Arbeit ist, die Grundlage einer Umsetzung einer kooperativen Automation für das teil- und hochautomatisierte Fahren bereitzustellen. Im Mittelpunkt sollen hier die technische Konkretisierung der gemeinsamen Handlungsplanung und Handlungsausführung, der Kompatibilität sowie der Kommunikation stehen.

Um die von den einzelnen Bestandteilen der Arbeit adressierten Bereiche der Fahrzeugführung zu verdeutlichen, wird das Drei-Ebenen-Modell der Fahrzeugführungsaufgabe nach Donges [47, S. 184] verwendet (siehe Abbildung 1.3). Donges strukturiert die Fahrzeugführungsaufgabe in die drei Ebenen Navigation, Bahnführung und Stabilisierung. Die Navigationsebene adressiert die Auswahl einer geeigneten Fahrtroute aus dem zur Verfügung stehenden Straßennetz. Auf der Bahnfüh-

rungsebene plant der Fahrer auf Grundlage der gewählten Fahrtroute sowie des aktuellen Straßenverlaufes und weiterer Objekte im Verkehrsraum die für den Fahrtablauf notwendigen Führungsgrößen. Auf der Stabilisierungsebene bewältigt der Fahrer die Aufgabe, das Fahrzeug den in der Bahnführungsebene spezifizierten Führungsgrößen folgen zu lassen. Das allgemeine Konzept der kooperativen Automation für das teil- und hochautomatisierte Fahren adressiert die gesamte Fahrzeugführungsaufgabe. Beginnend mit der technischen Konkretisierung des Konzeptes wird der adressierte Bereich eingeschränkt.

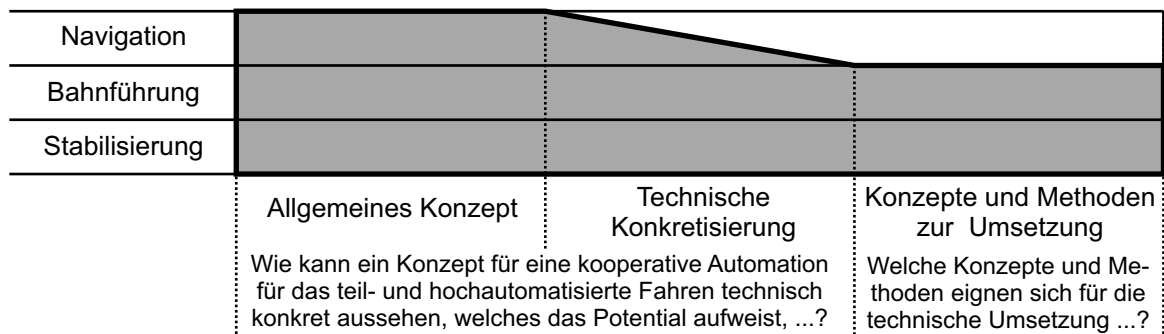


Abbildung 1.3: Zentrale Fragestellungen und einzelne Bestandteile der Arbeit sowie die im Dreiebenen-Modell der Fahrzeugführungsaufgabe nach Donges [47, S. 184] adressierten Ebenen

Die Konzepte und Methoden zur Umsetzung der kooperativen Automation für das teil- und hochautomatisierte Fahren fokussieren ausschließlich auf die Ebenen der Bahnführung und der Stabilisierung. Die Zielsetzung besteht darin, Ansätze für die Umsetzung der kooperativen Automation für das teil- und hochautomatisierte Fahren zu bieten und dadurch die technische Umsetzbarkeit des allgemeinen Konzeptes aufzuzeigen. Somit wird gegenüber anderen Arbeiten eine umfassende Auseinandersetzung mit dem Kooperationsgedanken von einem allgemeinen Konzept bis hin zu einer umfangreichen technischen Umsetzung erreicht. Die im Folgenden aufgeführten Anforderungen präzisieren die Zielsetzungen der technischen Bestandteile der Arbeit.

Aufgrund der Definition des teil- und hochautomatisierten Fahrens und der Betrachtung der Automation als eigenem Akteur muss diese die Fähigkeit haben, das Fahrzeug auch selbstständig führen zu können. Für die Kooperation mit der als eigenem Akteur betrachteten Automation müssen die Funktionen der Automation in einem integrierten System vorliegen. Die Funktionalität darf zum Beispiel nicht aus mehreren Fahrerassistenzsystemen zusammengesetzt werden, so dass dies für den Fahrer ersichtlich wird und er mit verschiedenen Einzelsystemen interagieren muss. Die Funktionalität muss die Beherrschung verschiedener Situationen und Manöver umfassen, so dass eine Autobahnfahrt vollständig abgedeckt werden kann. Dazu gehört unter anderem das Fahrstreifenwechselmanöver, auf das beispielhaft für den gesamten Verhaltensumfang detaillierter eingegangen werden soll. Die Kompatibilität der Automation zum Fahrer ist als eine zentrale Forderung für eine kooperative Automation besonders zu berücksichtigen (zum Beispiel bei der Generierung der Manöver). Der Beitrag der Arbeit ist in diesem Zusammenhang die Vorstellung eines integrierten Automationssystems für das teil- und hochautomatisierte Fahren, bei dem die Umsetzung des Kooperationsgedankens und seiner Teilaspekte konsequent im Fokus stehen. Bezüglich des aktuellen Entwicklungsstandes der Umsetzung der kooperativen Automation ist anzumerken, dass der Nachweis der generellen technischen Umsetzbarkeit im Vordergrund steht. Daher werden die

zur Erreichung eines höheren Entwicklungsstandes (bis hin zur Produktreife) notwendigerweise zu adressierenden Themen, wie zum Beispiel die Gewährleistung von funktionaler Sicherheit und Zuverlässigkeit, nur kurz angerissen.

Die durchgeführten Evaluierungen der Umsetzung der kooperativen Automation zielen einerseits auf den Nachweis der technischen Umsetzbarkeit des Konzeptes und der Funktionalität der Umsetzung ab. Andererseits soll das Potential hinsichtlich der Minimierung der aufgezeigten Probleme im Zusammenwirken von Mensch und Automation, der Erreichung eines signifikanten Komfort- und Sicherheitsgewinnes sowie der Akzeptanz durch den Fahrer aufgezeigt werden. Da die konkrete Ausgestaltung der Mensch-Maschine-Schnittstelle einen erheblichen Einfluss auf die Wirkung der kooperativen Automation beim Fahrer hat und diese Ausgestaltung in der vorliegenden Arbeit nicht adressiert wird (siehe Abbildung 1.2), können in diesem Kontext keine allgemeingültigen Aussagen für die betrachtete Automationsfunktionalität getroffen und damit Nachweise erzielt werden. Daher liegt der Fokus hier auf der Evaluierung der generellen Wirkrichtungen der kooperativen Automation unter Verwendung verschieden ausgestalteter Mensch-Maschine-Schnittstellen.

1.5 Vorgehensweise und Gliederung der Arbeit

Bei der Erarbeitung der in dieser Arbeit vorgestellten Ergebnisse wurde die in Abbildung 1.4 dargestellte Vorgehensweise angewendet. Die einzelnen Arbeitsschritte bilden darüber hinaus auch die Grundlage der Gliederung dieser Arbeit. Im Folgenden wird die Vorgehensweise zusammen mit der Gliederung vorgestellt.

Den Ausgangspunkt der Arbeit bilden die im vorliegenden Kapitel erläuterte Problemstellung sowie der daraus entwickelte Ansatz, die Fragestellungen und die Zielsetzungen der Arbeit. Im Anschluss daran wird in Kapitel 2 ein anhand der Fragestellungen der Arbeit ausgewählter Überblick über den Stand der Technik gegeben. Es erfolgt zunächst die Analyse von Konzepten zur Gestaltung des Zusammenwirkens von Mensch und Automation, um gemeinsam eine Aufgabe (zum Beispiel die Fahrzeugführungsaufgabe) auszuführen. Ein besonderes Augenmerk wird auf Konzepte gelegt, die die Automation als eigenen Akteur ansehen sowie auf Konzepte, die den Aspekt der Kooperation mit der Automation umfassen. Des Weiteren werden Arbeiten beleuchtet, die sich mit der technischen Umsetzung von Fahrerassistenzsystemen, vollautomatischen Systemen und teil- und hochautomatisierten Systemen beschäftigen.

Bei der folgenden Erarbeitung des allgemeinen Konzeptes der kooperativen Automation, seiner technischen Konkretisierung sowie der Konzepte und Methoden zur Umsetzung wurde ein iterativer Entwicklungsprozess angewendet. Dieser Entwicklungsprozess basiert auf dem iterativen Usability Designprozess (siehe zum Beispiel [151]), der aufgrund der Fragestellungen und Zielsetzungen der Arbeit um technische Evaluierungen, die ausschließlich auf die Überprüfung der Funktionalität abzielen, erweitert wurde. In diesem Entwicklungsprozess wechseln sich stetig Entwicklungs- und Evaluierungsphasen ab. So kann kontinuierlich der aktuelle Entwicklungsstand gegenüber den Zielsetzungen überprüft werden und eine möglichst zielgerichtete und damit effiziente Entwicklung ermöglicht werden. Der Zyklus aus Entwicklungs- und Evaluierungsphase wird so häufig durchlaufen, bis ein hinsichtlich der Fragestellungen und Zielsetzungen der Arbeit hinreichender Ent-

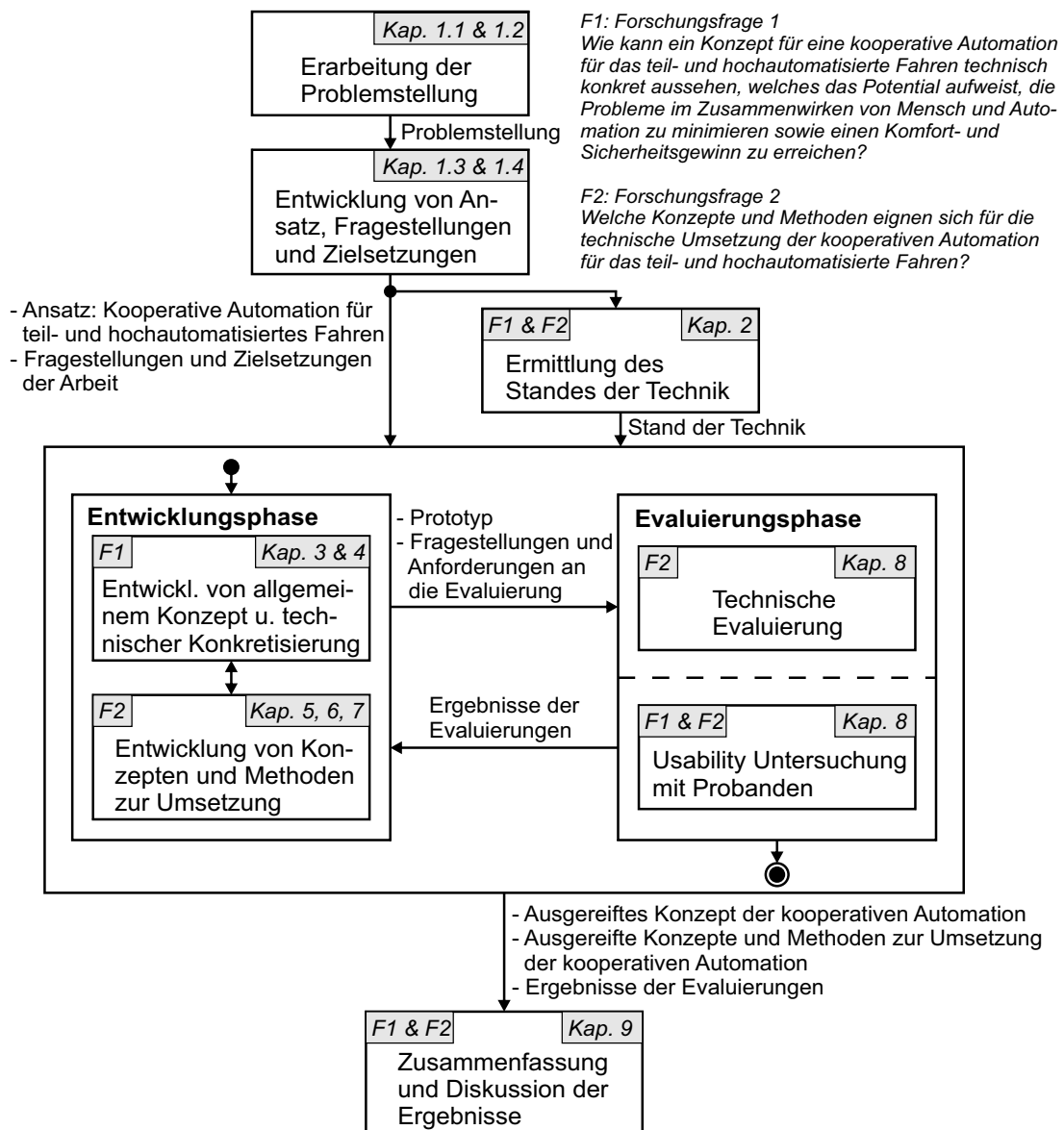


Abbildung 1.4: In dieser Arbeit angewendete Vorgehensweise mit Benennung der in den Arbeitsschritten adressierten Forschungsfragen und Zuordnung der Arbeitsschritte zu Kapiteln

wicklungsstand erreicht wird. Die Kapitel 3 bis 7 stellen jeweils den finalen Entwicklungsstand dar.

In Kapitel 3 wird das allgemeine Konzept der kooperativen Automation für das teil- und hochautomatisierte Fahren unabhängig von einer bestimmten Umsetzung vorgestellt. Basierend auf dieser allgemeinen Betrachtung des Konzeptes erfolgt in Kapitel 4 dessen technische Konkretisierung, um so die Grundlage zur Realisierung der kooperativen Automation zu schaffen.

Auf der Grundlage der technischen Konkretisierung werden in den folgenden Kapiteln Konzepte und Methoden zur technischen Umsetzung der kooperativen Automation vorgestellt. Kapitel 5 erläutert einen Ansatz zur manöverbasierten Umsetzung der kooperativen Automation für das teil- und hochautomatisierte Fahren. Als Teil der manöverbasierten Umsetzung wird in Kapitel 6 die Realisierung der Bearbeitungsebene Manöverplanung der kooperativen Automation detailliert beleuchtet. Die Darstellung der Modellierung des Manövers „Fahrstreifen wechseln“ im Rahmen der

manöverbasierten Umsetzung in Kapitel 7 bildet den Abschluss der Darlegung von Konzepten und Methoden zur technischen Umsetzung.

In Kapitel 8 wird zunächst ausführlich auf den angewendeten Entwicklungsprozess eingegangen sowie eine Gesamtübersicht der durchgeführten Evaluierungen gegeben. Dabei wird auch auf die für diese stetigen Evaluierungen notwendige prototypische Implementierung der kooperativen Automation und deren Integration in verschiedene Fahrsimulatoren und Versuchsfahrzeuge eingegangen. Des Weiteren erfolgt die detaillierte Vorstellung ausgewählter technischer Evaluierungen der kooperativen Automation sowie ausgewählter Usability Untersuchungen mit Probanden.

Kapitel 9 fasst schließlich die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit zusammen, diskutiert diese Ergebnisse und gibt einen Ausblick auf weiterführende Arbeiten.

2 Stand der Technik

Das durch die zentralen Fragestellungen der Arbeit (siehe Kapitel 1.4) aufgespannte Arbeitsfeld erfordert die Betrachtung des Standes der Technik in zwei Themenfeldern. Die Frage „Wie kann ein Konzept für eine kooperative Automation für das teil- und hochautomatisierte Fahren technisch konkret aussehen, welches das Potential aufweist, die Probleme im Zusammenwirken von Mensch und Automation zu minimieren sowie einen Komfort- und Sicherheitsgewinn zu erreichen?“ impliziert die Berücksichtigung von Konzepten zur Gestaltung des Zusammenwirkens von Mensch und Automation (Kapitel 2.1). Aufgrund der Frage „Welche Konzepte und Methoden eignen sich für die technische Umsetzung der kooperativen Automation für das teil- und hochautomatisierte Fahren?“ muss das Themenfeld der Assistenz und Automation im Fahrzeug (Kapitel 2.2) berücksichtigt werden.

In diesem Kapitel erfolgt nach der Vorstellung der jeweiligen in der Literatur beschriebenen Ansätze die Diskussion der Ansätze aus der Perspektive dieser in der vorliegenden Arbeit adressierten Fragestellungen.

2.1 Konzepte zur Gestaltung des Zusammenwirkens von Mensch und Automation

In der Literatur werden diverse Ansätze beschrieben, die sich mit der Gestaltung des Zusammenwirkens von Mensch und Automation beschäftigen. Bei der Auseinandersetzung mit diesen Ansätzen lassen sich zwei verschiedene Betrachtungsweisen feststellen. Zum einen werden die einzelnen für die Bedienung eines Systems benötigten Funktionen bzw. Teilfunktionen betrachtet und diese dann zwischen Mensch und Automation aufgeteilt. Die Gestaltung erfolgt somit funktionsorientiert mit der zentralen Fragestellung: „Wer bearbeitet welche (Teil-) Funktionen?“. Zum anderen steht die Fragestellung „Wie sollen Mensch und Automation zusammenarbeiten?“ im Mittelpunkt. Die Automation wird bei diesen Ansätzen als ein eigener Akteur betrachtet, mit dem eine Arbeitsbeziehung zur gemeinsamen Bedienung eines Systems gestaltet wird. Eine Untergruppe dieser Ansätze bilden diejenigen, in denen diese Arbeitsbeziehung kooperativ ausgeprägt ist.

Im Weiteren werden zunächst funktionsorientierte Ansätze dargestellt. Es folgen die Ansätze, die die Automation als eigenen Akteur betrachten, sowie diejenigen, bei denen die Beziehung zwischen den Akteuren kooperativ gestaltet ist. Neben der allgemeinen Betrachtung der Konzepte liegt der Fokus auf der Darstellung von Anwendungen dieser Konzepte im Bereich der Fahrzeug- und Flugzeugführung sowie von Evaluierungsergebnissen mittels Probandenstudien.

Funktionsorientierte Ansätze

Den Startpunkt bei der Gestaltung des Zusammenwirkens von Mensch und Automation bei der Bearbeitung einer Aufgabe bildete eine technikorientierte Vorgehensweise. Bei dieser steht alleine die

technische Funktionsentwicklung im Fokus des Interesses. Die Einbeziehung des Bedieners in die Bearbeitung der Aufgabe resultiert daraus, dass einzelne Funktionen, die zur Aufgabenbearbeitung benötigt werden, nicht automatisiert werden können. Diese Restfunktionen werden als Aufgaben für den Menschen festgelegt. Daraus resultiert häufig eine nicht ergonomische Funktionsteilung (siehe zum Beispiel [105]). Ein früherer Ansatz zur einfachen Berücksichtigung des Menschen bei der Gestaltung der Funktionsteilung ist die von Fitts [63] vorgestellte Methode der MABA-MABA-Listen (**man better at, machine better at**). Dabei ist es das Ziel, dem Menschen die Aufgaben zuzuweisen, die er besser erfüllt als die Automation. Gleichzeitig werden der Automation diejenigen Aufgaben zugewiesen, die sie besser erfüllt als der Mensch. Weitergehende Ansätze verfolgen eine mehr menschenorientierte Vorgehensweise und damit eine gezieltere Gestaltung der Aufgabenteilung zwischen Mensch und Automation, um einen möglichst hohen Nutzen für das Gesamtsystem zu generieren (siehe zum Beispiel [105]).

Kraiss [116] beschreibt verschiedene Formen der Aufgabenteilung zwischen Mensch und Automation. Bei der seriellen Funktionsteilung bearbeiten Mensch und Automation nacheinander bestimmte Teilaufgaben. Es ergibt sich eine delegative Beziehung zwischen den Beiden. Bei der parallelen Funktionsteilung (nicht redundant) erledigen der Mensch und die Automation gleichzeitig unterschiedliche Aufgaben. Die redundant-parallele Funktionsteilung weist dem Menschen und der Automation gleiche Aufgaben zu, die diese parallel abarbeiten. Abweichungen in den Ergebnissen des Menschen und der Automation bilden eine Grundlage für die von der Automation dargebotenen Informationen oder Eingriffe.

Parasuraman, Sheridan und Wickens [162] nutzen ein Modell der Informationsverarbeitung des Menschen, um zu bestimmen, was automatisiert werden soll. Das Modell beinhaltet die vier Stufen Informationsaufnahme, Informationsanalyse, Entscheidung über die auszuführende Handlung und Ausführung der Handlung. Jeder dieser vier Stufen kann ein anderer Automatisierungsgrad zugeordnet werden, der gegebenenfalls auch adaptiv sein kann.

Den Gedanken einer gemeinsamen Fahrzeugführung beschreiben Griffith und Gillespie in ihrem Konzept der „Shared Control“ [81, 82]. Der Fahrer und die Automation haben gleichzeitig und gemeinsam die Kontrolle über das Fahrzeug. Sie setzen zur Fahrzeugsteuerung ein aktives Stellteil ein, über das die Automation in die Steuerung eingreift. Der Fahrer kann die Aktionen der Automation wahrnehmen, sie überstimmen oder ihnen zustimmen. Griffith und Gillespie berücksichtigen keine weitere Kommunikation zwischen Fahrer und Automation. Das Konzept wird mit einem aktiven Lenkrad auf eine einfache Querführungsaufgabe angewandt. Bei einer mit diesem System in der Simulation durchgeführten Probandenstudie konnten sie nachweisen, dass der Fahrer in den Regelkreis der Fahrzeugführung eingebunden bleibt.

Ansätze mit Betrachtung der Automation als eigenständigem Akteur

Christoffersen und Woods [39] schlagen vor, die Automation als „Team Player“ zu entwerfen, der mit dem Bediener zusammenarbeitet, um gemeinsam eine Aufgabe zu erfüllen. Sie zeigen als wichtige Aspekte für eine solche Automation die „Observability“ und „Directability“ auf, die eine Zusammenarbeit erst ermöglichen. Der Begriff „Observability“ bezieht sich auf den Aufbau einer gemeinsamen Repräsentation des zu lösenden Problems und dessen aktuellen Zustandes. Des Weiteren beinhaltet die „Observability“, dass der Mensch eine Repräsentation der Handlungen der Au-

tomation aufbauen kann, um verstehen zu können, warum die Automation bestimmte Strategien ausführt und welche sie als Nächstes ausführen wird. Die „Directability“ gibt dem Menschen die Möglichkeit, die Aktionen der Automation grundlegend zu beeinflussen und damit gezielt die Aktionen der Automation in die Richtung zu lenken, bei der er ein Eingreifen für notwendig erachtet. Die Entwicklung von Möglichkeiten zur Koordination von Mensch und Automation ist für Christoffersen und Woods mindestens genauso wichtig, wie die Entwicklung der Fähigkeit der Automation zur Erfüllung ihrer Funktionen hinsichtlich des zu steuernden technischen Prozesses.

Miller und Parasuraman [137] schlagen ein Konzept der flexiblen Automation vor. Der Mensch kann flexibel Funktionen an die Automation delegieren und nimmt anschließend eine überwachende Funktion wahr. Damit soll die Automation an die speziellen Anforderungen des Bedieners adaptierbar sein. Die Delegation soll mittels einer mit der Interaktion mit einem anderen Menschen vergleichbaren Interaktion gestaltet sein. Sie wenden das Konzept der flexiblen Automation auf die Missionsplanung für unbemannte Flugzeuge an.

Ausgehend von generellen Überlegungen zur Automation und zu Problemen im Zusammenhang mit Automation in der Luftfahrt schlagen auch Young und Stanton [213] vor, die Automation als „Team Player“ zu gestalten. Sie sehen eine durchgängige Mischung der für das Fahren notwendigen Teilaufgaben mit einer gemeinsamen Verantwortung als die effizienteste Lösung an. Die entscheidende Frage bei der Gestaltung der Automation ist für sie nicht mehr „Wer macht was?“ („who does what?“), sondern die Frage „Wie kommen wir miteinander aus?“ („how do we get along?“). Der Mensch und die Automation arbeiten in einem Team harmonisch zusammen, um ein gemeinsames Ziel zu erreichen („both human and machine are working in harmony towards a common goal“). Um die in der Luftfahrt aufgetretenen Probleme mit Automation nicht im Straßenverkehr zu replizieren, müsse für die Gestaltung der Automation die Koordination und Kooperation von Mensch und Automation gezielt untersucht werden. Der Bereich des Straßenverkehrs weist für sie eine höhere Komplexität auf als die Luftfahrt, da die Umgebung (zum Beispiel aufgrund der anderen Verkehrsteilnehmer) sehr viel unkontrollierter sei bzw. stärker unerwartete Reaktionen zeige als in der Luftfahrt. Aufgrund dessen können Prinzipien zur Gestaltung von Automation in der Luftfahrt nicht unreflektiert auf den Bereich der Fahrzeuge übertragen werden.

Nagel beschäftigt sich mit der Gestaltung einer Automation für Fahrzeuge und fasst diese dabei ebenfalls als eigenen Akteur auf. Er schlägt vor, die Automation im Fahrzeug als „eigenständig Handelnden“ zu betrachten, so dass sich mit dem Fahrer und der Automation zwei innerhalb des Fahrzeuges handelnde Agenten ergeben [143]. Nagel sieht die Automation dabei auch als „maschinellen Ko-Piloten“ [140, 141]. Er stellt in seinen Beiträgen eine Vielzahl von Anforderungen vor, die seiner Meinung nach an einen „maschinellen Ko-Piloten“ [140] gestellt werden sollten. Ein „maschineller Ko-Pilot“ solle „durch eine auf das Wesentliche konzentrierte Kommunikation mit dem Fahrer für eine Übereinstimmung in der Beurteilung der aktuellen Verkehrssituation sowie der Alternativen für Maßnahmen sorgen“ [140]. Der „maschinelle Ko-Pilot“ solle die Fähigkeit besitzen, das Fahrzeug „autonom“ führen zu können, um die von ihm erwartete Unterstützung bieten zu können. Diese Forderung ist unabhängig von dem mit dem System realisierten Automatisierungsgrad. Die Idee der Gestaltung der Automation als Kopilot beschreiben zum Beispiel auch Donges und Naab [48] sowie Stiller [192]. „Langfristig erscheint [Stiller] das Verständnis eines 'partnerschaftlichen' Co-Piloten als Entwicklungsziel für Fahrerassistenzsysteme vernünftig“ [192, S. 14].

Ansätze mit kooperativer Arbeitsbeziehung zum Akteur Automation

Der Ansatz „Cooperative Control“ wurde von Sheridan bereits 1992 beschrieben [188]. Für ihn zeichnet sich das Konzept dadurch aus, dass einer der Akteure (Mensch oder Automation) eine Handlung initiiert und der andere sie anpasst oder verfeinert („There are also forms of cooperative control where control is initiated by one agent (human or computer) and the other trims or refines it“ [188, S. 65]).

Im Bereich der Automatisierung von Fahrzeugen beschäftigt sich Biester mit dem Ansatz der kooperativen Kontrolle [22, 23, 24]. Er schlägt in diesem Umfeld als Definition vor: „Kooperation wird als ein genereller Austauschprozess mit einem Minimum von zwei Akteuren beschrieben, die aufgrund gemeinsam definierter, übergeordneter Aufgaben aufeinander angewiesen sind. Beide übernehmen Teile der Gesamtaufgabe, um eine Lösung, ein positives Ergebnis der jeweiligen Aufgabe oder ein soziales Bedürfnis zu befriedigen (zum Beispiel Wirkungs- und Kosteneffektivität und Sicherheit)“ [22, S. 266/267]. Die Aufgabenbearbeitung erfolge durch den Menschen und die Automation gemeinsam und gleichzeitig, wobei „ausgelöste Funktionen immer als Endergebnis einer Interaktionsfolge zu verstehen“ seien. Der wesentliche Vorteil der Kooperation sei die Synergie für die beiden Akteure. Diese Synergie ist dadurch charakterisiert, dass die gemeinsame Handlung „einen gesamten Nettogewinn erzeugt, der größer ist als die ohne Kooperation erzielbaren Gewinne jedes einzelnen Akteurs“. Für Probandenstudien im Fahrsimulator emulierte er eine kooperative Automation mittels der Wizard-of-Oz-Methode [23, 24]. Die Anwendung dieser Methode bietet die Möglichkeit, ein nicht technisch umgesetztes System durch einen menschlichen Bediener zu emulieren. Für den Probanden wird es dabei nicht ersichtlich, dass es sich um eine Emulation handelt. Die Kommunikation der emulierten kooperativen Automation mit dem Fahrer wurde als ein sprachbasiertes Dialogsystem gestaltet. Dadurch war es dem Fahrer möglich, Informationen zur Verkehrssituation abzufragen oder Überwachungsaufgaben an die Automation zu delegieren. Des Weiteren umfasste die emulierte Funktionalität der Automation die Ausgabe verschiedener Warnungen. Die Steuerung des Fahrzeuges erfolgte vollständig manuell durch den Fahrer [24]. Die von Biester ermittelten Studienergebnisse zeigen ein gutes Situationsbewusstsein der Probanden während der Testfahrten sowie eine gute Akzeptanz des Systems. Eine positive Bewertung ergab sich außerdem für die Wirkung des Systems bezüglich der Erhaltung der für die Fahrzeugführung benötigten Fähigkeiten der Probanden [24]. Eine weitere technische Realisierung der Ideen fand nicht statt.

Hoc beschäftigt sich ausführlich mit dem Thema der Kooperation mit der Automation [90, 91, 92, 93, 94]. Für ihn ist eine kooperative Situation gegeben, wenn Automation und Mensch mindestens zwei Bedingungen erfüllen [90, 91]: „(1) Each one strives towards goals and can interfere with the other on goals, resources, procedures, etc. (2) Each one tries to manage the interference to facilitate the individual activities and/or the common task when it exists“ [91, S. 515]. Er definiert den Begriff „interference“ nach Castelfranchi [37]. Die Grundlage der Definition bildet die Annahme, dass das Ziel des einen Partners relevant für das Ziel des anderen Partners ist. Bei positiver Interferenz unterstützt das Ziel eines Partners das Ziel des anderen. Bei negativer Interferenz ist das Ziel des einen Partners gegen das Ziel des anderen gestellt. Hoc strukturiert seine Betrachtung des kooperativen Verhaltens in die Ebenen „Action Level“, „Plan Level“ und „Meta-Level“ [90, 94]. Der „Action Level“ bezieht sich auf die Kooperation bei der Handlungsausführung. Der

„Plan Level“ beschreibt kooperatives Verhalten, das einen größeren Abstand zur konkreten Handlungsausführung aufweist. Hierzu zählen der Aufbau von gemeinsamen Zielen und Plänen, einem gemeinsamen Rollenverständnis sowie einem gemeinsamen Situationsbewusstsein. Er fasst dies unter dem Begriff „Common Frame of Reference (COFOR)“ zusammen. Die dritte Ebene beschreibt den langfristig orientierten beiderseitigen Aufbau von mentalen Modellen der Automation und des Menschen sowie den Aufbau kompatibler Repräsentationen und einer gemeinsamen Sprache zur effektiven Kommunikation. Neben diesen Ebenen betrachtet Hoc verschiedene Kooperationsmodi, die er zur weiteren Strukturierung der Überlegungen innerhalb der einzelnen Ebenen verwendet [92, 94]. Der „Perception Mode“ ist definiert als eine Erweiterung bzw. Verbesserung der menschlichen Wahrnehmung. Im „Mutual Control Mode“ kann die Automation die Situation interpretieren und dem Fahrer Warnungen mitteilen, Handlungsvorschläge unterbreiten oder korrigierend eingreifen. Der „Function Delegation Mode“ zeichnet sich durch die Übernahme einer Teilfunktion durch die Automation aus. Im „Fully Automatic Mode“ übernimmt die Automation die Ausführung der gesamten Fahraufgabe. Der „Function Delegation Mode“ sowie der „Mutual Control Mode“ wurden in verschiedenen Systemen zur Querführung umgesetzt und in der Simulation sowie im realen Fahrzeug auf einer Teststrecke in Probandenstudien evaluiert [92, 93, 147, 148]. Die vorgestellte Umsetzung des „Function Delegation Mode“ bietet die Möglichkeit der automatischen Querführung, wobei die Längsführung manuell vom Fahrer ausgeführt wird. Der Fahrer hat die Möglichkeit, durch einen Lenkradeingriff die Funktion zu deaktivieren und die Querführung manuell zu übernehmen. Die Studienergebnisse zeigen jedoch, dass die Rückübernahme der Querführungsaufgabe den Fahrern Schwierigkeiten bereitete. Der Fahrstil der Automation bei Kurvenfahrten wurde von den Fahrern als nicht passend zu ihrem eigenen Fahrstil empfunden. Außerdem ergaben sich Hinweise, dass die Fahrer ein übermäßiges Vertrauen zur Funktion entwickelten und daher diese nicht mehr ausreichend hinterfragten. Die vorgestellten Umsetzungen des „Mutual Control Mode“ bedienen sich gerichteter akustischer Hinweise sowie gerichteter und ungerichteter Vibrationen, die am Lenkrad dargeboten werden. In den Studien wurde ein Nutzen dieser Funktionen hinsichtlich der Querführungsaufgabe nachgewiesen. Durch übermäßiges Vertrauen zur Funktion begründbare negative Effekte wurden nicht beobachtet.

Herczeg [89] beschreibt ein Konzept der „Intention-Based Supervisory Control“, das „kooperative Mensch-Maschine-Kommunikation in der Prozessführung ermöglichen“ soll. Mensch und Automation sollen dabei „bedarforientiert die Initiative in der Prozessführung übernehmen“ können. Voraussetzung für dieses Konzept ist für Herczeg, dass die „einzelnen Handlungs- und Kommunikationsebenen seitens Mensch und Maschine verträglich gestaltet werden, da es sonst keine Kommunikation und kooperative Problemlösung geben kann“. Es wird dazu ein hierarchisches Handlungsmodell des Menschen für die Prozessführung als Grundlage für die Erstellung einer funktionalen Systemarchitektur der Automation verwendet, so dass sich auf der Seite des Menschen und auf der Seite der Automation korrespondierende Ebenen ergeben. Detailliertere Umsetzungsaspekte werden nicht dargestellt [89].

Ideen zur Realisierung einer kooperativen Beziehung zwischen Mensch und Automation im Bereich der Luftfahrt beschreiben Onken et al. [159, 160, 161] und Schulte [185]. Sie betrachten die Automation als „subordinate electronic teammate“ [159] oder „additional electronic crew member“ [185]. Für sie kann Kooperation zwischen Mensch und Automation nur funktionieren, wenn eine

kognitive Automation als Basis genutzt wird. Die kognitive Automation deckt sämtliche Elemente des von Rasmussen [167] beschriebenen Drei-Ebenen-Modells des menschlichen Verhaltens ab. Sie führt die Aufgabenbearbeitung auf eine ähnliche Weise aus, wie auch ein Mensch sie ausführen würde. Auf Basis eines vollständigen Situationsverständnisses hat die Automation die Fähigkeit, vom Menschen beauftragte Instruktionen auszuführen, den Grund für diese Instruktionen zu verstehen, zu ermitteln, ob die Instruktionen vorgegebenen Zielen entsprechen und eigenständig Handlungen auszuführen, wenn dies aus Automationssicht notwendig für die Zielerreichung erscheint. Sie kann Fehlverhalten des Menschen erkennen und ihm Empfehlungen hinsichtlich des weiteren Vorgehens geben. Die Kommunikation mit dem Menschen soll menschenähnlich gestaltet sein und unter anderem zum Abgleich des Situationsverständnisses der beiden Akteure dienen. Das Konzept wurde prototypisch für die Systeme CAMA (**C**rew **A**ssistance **M**ilitary **A**ircraft) und TMM (**T**actical **M**ission **M**anagement **S**ystem) zur Unterstützung von Flugzeugbesatzungen im Bereich der militärischen Flugzeugführung umgesetzt [161, 185]. Das System CAMA dient der Unterstützung der Flugzeugbesatzung bei der Flugzeugführung in militärischen Transportmissionen [161, 186]. Die Realisierung der Unterstützungsleistung erfolgt durch audiovisuelle Kommunikation. Es erfolgten Studien zur Evaluierung des Systems sowohl im Simulator als auch im realen Flugzeug [161], in denen insgesamt positive Ergebnisse erzielt wurden. Unter anderem zeigte sich eine gute Akzeptanz des Systems, ein gutes Situationsbewusstsein der Besatzung bei der Systemnutzung und eine gute Bewertung hinsichtlich des Systemnutzens [161, 186]. Ebenfalls positive Ergebnisse wurden bei der Evaluierung des TMM Systems im Flugsimulator erzielt [185]. Dieses System dient der Unterstützung von Kampfflugzeugpiloten bei Luft-Boden-Angriffen. Unter anderem wurde ein positiver Einfluss des Systems auf das Situationsbewusstsein der Piloten und ein verringertes Risiko von Bodenkollisionen im Vergleich mit der Nutzung eines Referenzsystems festgestellt [185].

Eine Metapher zur Gestaltung des kooperativen Zusammenwirkens von Mensch und Automation ist die H-Metapher [42, 65, 67]. Als Vorbild für die Gestaltung dient das Zusammenwirken eines Reiters oder Kutschers mit seinem Reit- oder Kutschpferd (Horse). Ausgangsbasis der Metapher ist die von Flemisch et al. [42, 65, 67] beschriebene Fähigkeit von Pferden sich sicher selbstständig fortzubewegen. Die Beziehung zwischen Reiter oder Kutscher und Pferd wird für die Metapher folgendermaßen beschrieben [42, 65, 67]: Durch die Möglichkeit der Kommunikation zwischen Reiter oder Kutscher und Pferd können sowohl die Handlungen des Reiters oder Kutschers durch das Pferd als auch die Handlungen des Pferdes durch den Reiter oder Kutscher beeinflusst werden. Der Reiter oder Kutscher kann dem Pferd ein hohes Maß an Selbstbestimmung bei der Wahl der Handlungen überlassen, er kann es aber auch direkter kontrollieren und so die Handlungsauswahl des Pferdes stark bestimmen. Trotzdem hat das Pferd bei direkter Kontrolle die Fähigkeit, den Reiter oder Kutscher auf Gefahren aufmerksam zu machen und gegebenenfalls selbstständig zu reagieren. Flemisch et al. sehen die H-Metapher als eine „eher übergeordnete, generische Beschreibung eines Gesamtsystems“ [67]. Das darauf aufbauende H-Mode Konzept sei „eine konkrete Anwendung der Metapher auf die Interaktion zwischen dem Fahrer und einem hochautomatisierten Fahrzeug“ [67]. Der Fokus bei der Entwicklung der Interaktion im Rahmen von H-Mode liegt auf der Nutzung der Haptik mittels des Einsatzes aktiver Stellteile. Da die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit auch im Rahmen der Ausarbeitung und Umsetzung des H-Mode Konzeptes genutzt worden sind, erfolgt an dieser Stelle nur die Darstellung des Konzeptstandes vor Beginn dieser Arbeit. Für die ersten

Probandenstudien wurden H-Mode Systeme mittels der Wizard-of-Oz-Methode im Fahrsimulator emuliert. Diese Emulationen adressierten ausschließlich die Längsführung mit Teilfunktionen wie zum Beispiel Anfahren, Anhalten und Distanz halten zu einem Vorderfahrzeug. Es werden keine Ergebnisse hinsichtlich der Akzeptanz und der Wirksamkeit des Konzeptes bezüglich der Minimierung negativer Automationseffekte vorgestellt [67, 69]. In einer weiteren Probandenstudie wurde im Simulator ein einfaches System evaluiert, das ein hochautomatisiertes Fahren auf einem Fahrstreifen ohne Verkehr ermöglichte. Hier wurde eine gute Akzeptanz des Systems durch die Probanden festgestellt [67].

Fazit

Bei der Gesamtbetrachtung der Ansätze ist zunächst festzustellen, dass der Detaillierungsgrad der vorgestellten Ansätze von groben Ideen bis hin zu detailliert ausgearbeiteten Konzepten reicht. Um als Grundlage einer technischen Umsetzung dienen zu können, müssten die Ansätze, die nicht über einen hohen Detaillierungsgrad verfügen, deutlich weiter ausgearbeitet werden.

Einige der detaillierter ausgearbeiteten Konzepte wurden im Bereich der Fahrzeug- und Flugzeugführung umgesetzt. Es erfolgte jedoch keine Anwendung im Bereich des teil- oder hochautomatisierten Fahrens. Die Umsetzungen adressieren die Bereiche des assistierten Fahrens sowie den Bereich des hochautomatisierten Fliegens. Dies zeigt zum einen, dass die Ansätze nicht in Richtung des teil- und hochautomatisierten Fahrens ausgearbeitet worden sind. Zum anderen kann nicht davon ausgegangen werden, dass sich die guten Studienergebnisse hinsichtlich der Wirksamkeit der Konzepte zur Minimierung von negativen Automationseffekten auch bei einer Umsetzung für teil- und hochautomatisiertes Fahren beobachten lassen. Dennoch bieten diese Studienergebnisse wertvolle Hinweise zur Gestaltung von einzelnen Elementen des Zusammenwirkens von Mensch und Automation für teil- und hochautomatisiertes Fahren.

Hinsichtlich der Anwendbarkeit der Ansätze auf den Bereich der Fahrzeugführung im Allgemeinen ist anzumerken, dass von einer direkten Übertragbarkeit der domänenunabhängigen oder auf die Luftfahrt abzielenden Überlegungen auf die Fahrzeugführung nicht ausgegangen werden kann. Dies begründet sich dadurch, dass die Anwendungsdomäne einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss auf ein Automationskonzept hat, wie zum Beispiel auch Inagaki [102] feststellt: “It is noted that human-centered automation can be domain-dependent: e.g., ‘human-centered automation for automobile’ can be quite different from ‘human-centered automation for aviation system’ “ [102]. Diese nicht den Bereich der Fahrzeugführung adressierenden Ansätze bilden den größeren Teil der bekannten Arbeiten.

Da das in der vorliegenden Arbeit vorgeschlagene Konzept der kooperativen Automation für das teil- und hochautomatisierte Fahren in die Kategorie der Ansätze mit kooperativer Gestaltung der Arbeitsbeziehung zur Automation einzuordnen ist, erfolgt abschließend eine besondere Betrachtung dieser Ansätze. Keiner dieser vorgestellten Ansätze bietet eine grundlegende Auseinandersetzung mit der Idee der Kooperation im Hinblick auf teil- und hochautomatisiertes Fahren. Demzufolge ist auch keine detaillierte Ausarbeitung der Kooperationsidee für das teil- und hochautomatisierte Fahren zu finden. Ebenso ist somit keine Berücksichtigung der Möglichkeiten des teil- und hochautomatisierten Fahrens hinsichtlich des erreichbaren Sicherheits- und Komfortgewinnes sowie den daraus resultierenden Anforderungen vorhanden.

2.2 Assistenz und Automation im Fahrzeug

Dem Bereich der Assistenz und Automation im Fahrzeug lassen sich vielfältige in der Literatur beschriebene Systeme zuordnen, die diverse Teilaufgaben der Fahrzeugführungsaufgabe adressieren. Zu diesen Teilaufgaben zählen sämtliche der im Drei-Ebenen-Modell der Fahrzeugführungsaufgabe nach Donges [47, S. 184] vorhandenen Ebenen (siehe auch Kapitel 1.4 und Abbildung 1.3). Aufgrund der Zielsetzung der vorliegenden Arbeit liegt der Fokus bei der Betrachtung des Standes der Technik auf der Stabilisierungs- und Bahnführungsebene. Der Fokus auf der Stabilisierungsebene wird weiter dadurch eingeschränkt, dass die dieser Ebene zuzuordnenden Fahrdynamikregelsysteme im Rahmen dieser Arbeit nicht relevant sind.

Im Weiteren werden zunächst Assistenz- und Automationssysteme betrachtet, deren Automatisierungsgrad sich bis zum assistierten Bereich erstreckt. Im Allgemeinen werden diese Systeme als Fahrerassistenzsysteme bezeichnet (Kapitel 2.2.1). Es folgt die Beleuchtung vollautomatischer Fahrzeuge (Kapitel 2.2.2) sowie die Darstellung von Automationen, die teil- oder hochautomatisiertes Fahren ermöglichen (Kapitel 2.2.3).

Das Hauptaugenmerk bei der Betrachtung der Systeme liegt einerseits auf ihren allgemeinen Fähigkeiten und ihrer Verwendbarkeit für die Realisierung des teil- und hochautomatisierten Fahrens unter Berücksichtigung der Zielsetzungen der vorliegenden Arbeit. Andererseits wird beleuchtet, inwieweit der Fahrer bei der Gestaltung der Funktionen des Systems berücksichtigt wurde und wie das Zusammenwirken von Fahrer und System gestaltet ist.

Vor der Auseinandersetzung mit den einzelnen Systemen muss jedoch ein Projekt erwähnt werden, das einen wesentlichen Einfluss auf die Entwicklung des gesamten Bereichs der Assistenz und Automation im Fahrzeug hatte. Dieses ist das EUREKA-Projekt PROMETHEUS (**P**rogramme for a **E**uropean **T**raffic with **H**ighest **E**fficiency and **U**nprecedented **S**afety) [27, 28, 64]. In diesem Projekt wurden von 1986 bis 1994 unterschiedlichste Fragestellungen bearbeitet, um „Konzepte und Lösungen zu schaffen, die den Weg zu einem flüssigen Straßenverkehr, hoher Umweltverträglichkeit und Wirtschaftlichkeit mit bisher noch nie erreichter Sicherheit weisen“ [201]. Es wurden sowohl Fahrerassistenzsysteme als auch vollautomatische Fahrzeuge entwickelt, von denen einzelne in den folgenden Abschnitten vorgestellt werden. Darüber hinaus erfolgten auch allgemeinere Überlegungen hinsichtlich des Zusammenwirkens von Fahrer sowie Assistenz und Automation im Fahrzeug. Dies drückt sich zum Beispiel durch folgende Fragen aus [27]: „Wie kann eine Bevormundung des Fahrers durch die technischen Systeme vermieden werden?“, „Wie kann die Konsistenz und Transparenz des Systemverhaltens für den Fahrer sichergestellt werden?“, „Welche Form der Fahrerunterstützung ist zweckmäßig, um nachteilige Effekte durch Kompetenzverlust gerade bei schwierigen Fahrmanövern zu verhindern?“, „Wie kann sichergestellt werden, dass die dem Fahrer verbleibenden Fahraufgaben zu einer nahen an seinem Leistungsoptimum liegenden Belastung führen, also weder Unter- noch Überforderung bewirken?“. Darüber hinaus stellen Braess et al. [28] unter anderem die Forderungen „Erhaltung bzw. Erweiterung der Handlungsspielräume“, „Sicherstellung der Gültigkeit von mentalen Modellen“, „Adaptierbarkeit an verschiedene Fahrergruppen“ und „Konsistentes und transparentes Verhalten“ an eine Assistenz oder Automation.

2.2.1 Fahrerassistenzsysteme

Ein großer Teil der in der Literatur beschriebenen Fahrerassistenzsysteme adressiert ausschließlich die Unterstützung des Fahrers bei der Längsführung oder der Quersführung des Fahrzeuges. Die Darstellung der Systeme beginnt daher mit diesen beiden Gruppen. Im Anschluss werden Systeme betrachtet, die sich mit der Vermeidung von frontalen Kollisionen befassen. Den Abschluss bildet die Darstellung von Fahrerassistenzsystemen, bei denen mehrere Einzelfunktionen zu einem Gesamtsystem integriert sind.

Fahrerassistenzsysteme zur Unterstützung der Längsführung

Das Adaptive Cruise Control (ACC) System bietet dem Fahrer eine Automatisierung der Längsführungsaufgabe. Dabei wird neben dem Einregeln einer vom Fahrer gesetzten Geschwindigkeit einem gegebenenfalls vorhandenen Vorderfahrzeug mit einer ebenfalls durch den Fahrer einstellbaren Zeitlücke gefolgt [139, 211]. Einige Systeme funktionieren nur bis zu einer Mindestgeschwindigkeit, andere Systeme bieten eine Automatisierung bis zum Stillstand mit anschließendem Wiederanfahren an. Diese können zum Beispiel auch in einer Stausituation genutzt werden. Der Fahrer bedient das System über zusätzliche Bedienelemente (zum Beispiel Lenkradtasten). Durch eine Betätigung des Gaspedals hat er die Möglichkeit, das System zu übersteuern. Im Anschluss daran übernimmt es wieder die Regelung. Eine Betätigung des Bremspedals hat die Deaktivierung des Systems zur Folge. Die Nachvollziehbarkeit der Systemfunktion ist bei der Gestaltung der Systeme eine wichtige Anforderung [211]. Im Projekt PROMETHEUS wurde eine derartige Abstands- und Geschwindigkeitsregelung unter der Bezeichnung „Autonomous Intelligent Cruise Control“ entwickelt [28]. Naab [139] stellt eine Systemvariante auf Basis eines aktiven Gaspedals vor. Die Automation übernimmt nicht direkt die Längsregelung, sondern bestimmt die Position eines Druckpunktes im Gaspedal. Folgt der Fahrer diesem Druckpunkt, so wird die von der Automation gewünschte Beschleunigung umgesetzt. Wünscht der Fahrer eine höhere Beschleunigung, so kann er den Druckpunkt überdrücken. Durch einen verminderten Druck auf das Pedal kann er eine kleinere Beschleunigung erreichen. Mayser [133] beschreibt ein erweitertes ACC System, bei dem der Fahrer durch ein zusätzliches Bedienelement eine Beschleunigung vorgeben kann, die zur vom ACC System bestimmten Beschleunigung addiert wird. Diese gemeinsame Beschleunigung wird anschließend umgesetzt. Verschiedene Arbeiten beschäftigen sich mit Verbesserungen der Funktion des ACC Systems, um die Akzeptanz der Nutzer zu erhöhen bzw. das Systemverhalten dem eines manuell geführten Fahrzeuges weiter anzunähern. Beispiele dafür sind Arbeiten zur Analyse des Fahrverhaltens von Fahrern [62], zur Fahreradaptivität [44] oder zur Berücksichtigung der Fahrsituation, um das Verhalten des ACC Systems dem spezifischen Fahrverhalten von Fahrern in dieser Situation anzunähern [21, 70, 111, 172, 217].

Ein Curve Speed Warning System (CSWS) warnt den Fahrer vor Einfahrt in eine Kurve, wenn die aktuelle Fahrzeuggeschwindigkeit eine zu hohe Querschleunigung bei der Durchfahrt der Kurve erwarten lässt. Dazu wird ein Geschwindigkeitsprofil in Abhängigkeit der Krümmung der Kurve und zugelassener Beschleunigungen oder Kräfte berechnet [4, 16, 104, 132, 187]. Die von Mayser et al. [132] und Aguilera et al. [4] vorgestellten Systeme bieten zusätzlich zu verschiedenen Warnmodi einen Modus, in dem die Automation die Längsführung automatisch übernimmt und die Fahrzeuggeschwindigkeit der Geometrie der Strecke anpasst. Bei der Auslegung des Systems werden von

Mayser et al. [132] Ergebnisse aus Analysen des Fahrverhaltens von Fahrern berücksichtigt und in verschiedenen Fahrstilen, die vom Fahrer ausgewählt werden können, im System abgelegt. Die von Aguilera et al. [4] zur Verfügung gestellten Modi basieren auf den Überlegungen von Hoc zu den verschiedenen Kooperationsmodi (siehe Kapitel 2.1, zum Beispiel [94]).

Als konsequente Weiterentwicklung der vorgestellten Systeme zielen verschiedene Arbeiten auf eine möglichst vollständige Automatisierung der Längsführungsaufgabe ab (siehe zum Beispiel Dornieden et al. [49]). Diese Systeme berücksichtigen dazu unter anderem Vorderfahrzeuge, Geschwindigkeitsbegrenzungen sowie Krümmungen von Kurven.

Fahrerassistenzsysteme zur Unterstützung der Querführung

Zur Unterstützung der Querführung dienen **Lane Departure Warning Systems (LDWS)** und **Lane Keeping Assistance Systems (LKAS)**. Ein LDWS warnt den Fahrer vor dem Verlassen des aktuellen Fahrstreifens. Dies kann mittels akustischer, visueller oder haptischer Warnungen erfolgen, die gerichtet oder ungerichtet gestaltet sein können [76]. Bei einem LKAS wird der Lenkung ein zusätzliches Drehmoment aufgeprägt, das den Fahrer beim Halten des aktuellen Fahrstreifens unterstützt [48, 77]. Im Gegensatz zum LDWS greift das LKAS durch das eingebrachte Drehmoment aktiv in die Querführung des Fahrzeuges ein. Das Drehmoment reicht jedoch nicht aus, um das Fahrzeug automatisch zu steuern und kann jederzeit vom Fahrer übersteuert werden [139]. Für das im Rahmen von PROMETHEUS entwickelte System „Heading Control“ wurde auf Modelle des Lenkverhaltens von Fahrern zurückgegriffen, um ein Systemverhalten zu erzeugen, das den Erwartungen des Fahrers möglichst nahe kommt [28, 139].

Netto et al. [148] beschreiben auf Basis der von Hoc (siehe Kapitel 2.1, zum Beispiel [94]) vorgestellten Kooperationsmodi verschiedene Auslegungen von Systemen zur Unterstützung der Querführung. Eine delegative Automatisierung wird durch einen Modus geboten, in dem die Querführung vollautomatisch übernommen werden kann. In einem „korrektiven“ Modus fährt der Fahrer in einem Bereich in der Mitte des Fahrstreifens manuell. Überschreitet die Querabweichung des Fahrzeuges von der Fahrstreifenmitte einen bestimmten Schwellwert, so wird die Querführung vollautomatisch übernommen und das Fahrzeug zurück in Richtung der Fahrstreifenmitte geführt. Die automatische Querführung wird abgeschaltet, sobald der Schwellwert der Querabweichung unterschritten wird oder der Fahrer am Lenkrad eine der Aktion der Automation entgegengerichtete Stellaktion ausführt. In einer weiteren Ausprägung wird der „korrektive“ Modus um einen Bereich erweitert, in dem der Lenkung ein zusätzliches Drehmoment aufgeprägt wird. Dieses ist aktiv, bevor die Querführung automatisch übernommen wird. Hsu et. al [100] beschreiben ebenfalls ein korrekatives System. Die Automation bestimmt einen Bereich von Lenkwinkeln, mit denen es möglich ist, das Fahrzeug auf dem Fahrstreifen zu halten. Überschreitet der tatsächliche Lenkwinkel diesen Bereich, wird in einen automatischen Modus geschaltet, in welchem die Automation die Querführung übernimmt. Der Fokus der Arbeit von Hsu et. al liegt auf der Stabilität des Gesamtsystems.

Verschiedene Ansätze haben zum Ziel, die Assistenzfunktion in Abhängigkeit der Situation oder der Absicht des Fahrers adaptiv zu gestalten. So schlagen zum Beispiel Blaschke et al. [25] vor, ein System zur Fahrerabsichtserkennung mit der Querführungsunterstützung so zu kombinieren, dass bei Erkennung der Absicht eines Überholmanövers die Warnung vor dem Verlassen des Fahrstreifens unterdrückt wird. Im Teilprojekt SAFELANE aus PReVENT [106, 166] wird explizit zwischen

beabsichtigtem und unbeabsichtigtem Verlassen des Fahrstreifens unterschieden, um die Reaktion des Assistenzsystems zu bestimmen. Dazu werden Informationen aus dem Fahrzeugumfeld und Teile des Fahrerzustands verwendet. Bei einem beabsichtigten Verlassen des Fahrstreifens werden die Warnungen und das zusätzliche Drehmoment des Systems deaktiviert.

Cerone et al. [38] stellen eine Methode vor, um die automatische und manuelle Querführung ohne Umschalten von Algorithmen zu kombinieren. Bringt der Fahrer kein Drehmoment auf das Lenkrad, so erfolgt die Querführung automatisch mit dem Ziel, die Mitte des aktuellen Fahrstreifens zu halten. Sobald ein vom Fahrer aufgebrachtes Drehmoment vorliegt, erfolgt ein weicher Übergang zur manuellen Querführung. Der Fahrer kann so manuell einen Fahrstreifenwechsel ausführen und im Anschluss die Querführung durch Freigeben des Lenkrades wieder an die Automation übergeben. Um dieses Verhalten zu realisieren, wird eine Reglerstruktur mit zwei Freiheitsgraden genutzt. Zur Unterstützung bei Fahrstreifenwechselmanövern dienen **Lane Change Decision Aid Systems (LCDAS)**. Diese Systeme warnen den Fahrer, wenn sich ein Fahrzeug auf einem benachbarten Fahrstreifen befindet, welches ein Fahrstreifenwechselmanöver dorthin unmöglich bzw. gefährlich werden lässt [9, 13, 202].

Fahrerassistenzsysteme zur Vermeidung frontaler Kollisionen

Neben verschiedenen Systemen, die den Fahrer bei drohenden frontalen Kollisionen warnen oder die Folgen einer solchen Kollision zu vermindern versuchen (zum Beispiel [59, 210]), werden zur Vermeidung von Unfällen **Collision Avoidance Systems (CAS)** entwickelt. Diese Systeme haben die Fähigkeit, Notbrems- oder Notausweichmanöver zu initiieren. Ameling [10] stellt ein System vor, das vollautomatisch das Notmanöver (Notbremsen, Ausweichen nach rechts oder links) ausführt, welches als Letztes die Kollision vermeiden kann. Der wesentliche Fokus dieser Arbeit liegt auf der Erkennung einer Kollisionssituation. Zur Realisierung des Ausweichmanövers wird das Fahrzeug mittels einer „virtuellen Deichsel“ am Hindernis vorbei geführt. Das von Mildner [136] beschriebene System führt ebenfalls automatisch das Manöver aus, welches als Letztes die Kollision vermeiden kann. Neben der Kollisionserkennung liegt hier der Fokus auf der Umsetzung der Notmanöver. Diese sollen das Kraftschlusspotential ausnutzen. Die Bestimmung der Ausweichbahn basiert auf der Vorgabe einer Sinusfunktion für die Querbeschleunigung, während des Ausweichmanövers wird parallel abgebremst.

An der Technischen Universität Darmstadt wurde das System „**PRORETA**“ [19, 20] entwickelt. Die Entwicklung dieses Systems erfolgte begleitet von ergonomischen Studien, in denen das Verhalten der Versuchspersonen in kritischen Situationen sowie ihre Reaktionen auf verschiedene Systemvarianten untersucht wurden. Ein vollautomatisches Notbrems- oder Notausweichmanöver erfolgt im physikalisch letztmöglichen Moment. Es werden Ausweichmanöver mit und ohne gleichzeitigem Bremseingriff realisiert. Als Ausweichbahn wird eine Sigmoidfunktion eingesetzt. In einer Systemvariante erfolgt für das Ausweichen kein vollautomatischer Eingriff, sondern es wird mittels der eingesetzten Überlagerungslenkung ein kurzzeitiger Zusatzlenkwinkel aufgeschaltet, der das Fahrzeug in die „richtige“ Richtung lenkt. Im Rahmen des Projektes durchgeführte Fahrversuche zeigten, dass der Fahrer in der Lage ist, das Ausweichmanöver nach diesem Lenkimpuls manuell abzuschließen. Die Umsetzung des Systems basiert auf seriennaher Sensorik. Es erfolgt allerdings keine Überprüfung,

ob die Durchführung eines Ausweichmanövers aufgrund von seitlichen oder rückwärtigen Objekten möglich ist.

Integrierte Fahrerassistenzsysteme

Verschiedene Projekte zielen darauf ab, mehrere der beschriebenen Funktionen in einem gemeinsamen Konzept zu integrieren. Im Teilprojekt INSAFES aus PREVENT [8] wurde zum Beispiel ein System vorgestellt, das die Funktionen von unter anderem LKAS, LDWS, LCDAS, CSWS und Systemen zur Kollisionswarnung integriert.

Das von Kopf [114] vorgestellte System „DAISY“ (**D**river **A**ssisting **S**ystem) bietet ein integriertes Konzept zur fahreradaptiven Unterstützung bei der Längs- und Querverführung des Fahrzeuges. Das System warnt zum Beispiel beim Verlassen des Fahrstreifens oder bei zu geringem Abstand zum Vorderfahrzeug. Die Warnungen werden durch einen Vergleich der aktuellen Fahrerreaktion mit dem individuellen Fahrernormalverhalten, das in einer Lernphase gewonnen wurde, generiert.

Das von Sattel und Brandt [29, 30, 173, 174] vorgestellte System vereint die Funktionalitäten eines LKAS und LDWS mit einem Kollisionsvermeidungssystem. Auf Basis einer kontinuierlich geplanten kollisionsfreien Bahn werden ein zusätzliches Drehmoment zur Kommunikation des von der Automation gewünschten Lenkradwinkels und Warnvibrationen in die Lenkung eingespielt. Diese Unterstützung wird kontinuierlich geboten. Im Falle einer drohenden Kollision kann eine stärkere Unterstützung erfolgen. Im Rahmen des Assistenzsystems ist kein vollautomatisches Notmanöver vorgesehen. Die Längsführung wird vom Fahrer manuell durchgeführt. Ein Schwerpunkt der Arbeiten liegt auf der Entwicklung einer potentialfeldbasierten Bahnplanungsmethode mit Hilfe von elastischen Bändern. Die vom Fahrer beeinflussbare Ausrichtung des Fahrzeuges und der aktuelle Lenkwinkel fließen in die Berechnung der Bahn ein. Kann ein Objekt links oder rechts passiert werden, kann der Fahrer so Unterstützung in die Richtung erhalten, die er beabsichtigt. Die Automation bietet allerdings nicht die Möglichkeit anzuzeigen, ob beide Handlungsoptionen für die Automation durchführbar wären. Erst, wenn der Fahrer in die zunächst nicht von der Automation gewählte Richtung steuert, erfolgen die Prüfung und gegebenenfalls die Unterstützung dieser Handlungsoption. Mit diesem Assistenzsystem wurden Studien mit Probanden durchgeführt. Die Fähigkeit des Bahnplanungsalgorithmus zur vollautomatischen Fahrzeugführung wurde mit Hilfe von konstant gehaltener Geschwindigkeit gezeigt. Brandt [29] sieht das System als eine Umsetzung von gemeinsamer Fahrzeugführung von Mensch und Automation.

Fazit

Die Fähigkeiten der vorgestellten Fahrerassistenzsysteme reichen nicht aus, um das in dieser Arbeit als Ziel formulierte kooperative teil- und hochautomatisierte Fahren zu realisieren. Sie bieten jedoch eine Vielzahl von Anregungen für die Gestaltung der kooperativen Automation sowie verwendbare Konzepte und Methoden für die technische Umsetzung von Teilaspekten.

Aus der technischen Sichtweise fehlt den Systemen zur Realisierung des teil- und hochautomatisierten Fahrens die Fähigkeit, das Fahrzeug automatisch führen zu können. Einzelne zur Verhaltenszeugung genutzte Algorithmen lassen sich jedoch im Rahmen eines zu erstellenden Gesamtkonzeptes nutzen. Ein weiterer Schwachpunkt aus technischer Sichtweise ist die eingeschränkte Situationswahrnehmung vieler der vorgestellten Einzelsysteme. Im Gegensatz zu einem teil- oder hochauto-

matisierten System berücksichtigen zahlreiche Einzelsysteme (zum Beispiel LKAS, LDWS, ACC) nur einen Ausschnitt aus der Gesamtsituation. Damit ist eine Erzeugung situationsangepasster und damit auch kompatibler Handlungen schwer möglich. Für die Nutzung einzelner Algorithmen in einem Gesamtkonzept zum teil- und hochautomatisierten Fahren bedeutet dies, dass eine unabhängige parallele Nutzung von verschiedenen Algorithmen nicht ausreicht, um ein situationsangepasstes und kompatibles Verhalten zu erzeugen.

Aus der Sichtweise der kooperativen Fahrzeugführung von Fahrer und Automation ist festzustellen, dass die Kooperations- und Kommunikationsmöglichkeiten bei den betrachteten Systemen beschränkt bleiben. Durch die Bandbreite der Gestaltung des Zusammenwirkens von Fahrer und Assistenzsystem werden jedoch viele Anregungen zur Gestaltung des kooperativen Verhaltens der Automation geboten. Ergebnisse aus mit den Fahrerassistenzsystemen durchgeführten Probandenstudien bilden ebenfalls eine wichtige Grundlage für Überlegungen zur Gestaltung der Zusammenarbeit von Fahrer und kooperativer Automation.

2.2.2 Vollautomation

In den zurückliegenden Jahrzehnten wurde eine Reihe von Forschungsprojekten zur Realisierung des vollautomatischen Fahrens durchgeführt. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit sind Projekte interessant, die verschiedene Verhaltensweisen abdecken und deren (geplanter) Einsatzbereich der öffentliche Straßenverkehr ist. Um die Fähigkeiten derartiger Systeme und die diesen zugrunde liegenden Konzepte aufzuzeigen, wurden die im Folgenden dargestellten Projekte exemplarisch ausgewählt. Es werden zuerst die Arbeiten der Universität der Bundeswehr München und des Fraunhofer-Institutes für Informations- und Datenverarbeitung Karlsruhe beschrieben, die ihren Ausgangspunkt im Projekt PROMETHEUS haben. Des Weiteren werden die im Rahmen der DARPA Grand Challenges angesiedelten Arbeiten und der Sonderforschungsbereich „KogniMobil“ vorgestellt.

Der beachtliche Fortschritt bei der Umfelderkennung, der unter anderem durch die Arbeit an vollautomatischen Fahrzeugen begründet ist, hat das vollautomatische sowie teil- und hochautomatisierte Fahren erst ermöglicht. Trotz des Fortschritts besteht in diesem Bereich noch ein nicht zu vernachlässigender Bedarf an Forschungs- und Entwicklungsarbeit, um Systeme zu entwickeln, die ein umfassendes, hinreichend robustes und qualitätsgesichertes Abbild der Umgebung erzeugen, wie es zum Beispiel für eine Serienentwicklung benötigt wird.

Beispiel 1: Universität der Bundeswehr München

An der Universität der Bundeswehr München wurde in der Arbeitsgruppe um Dickmanns [46] seit Anfang der 1980er Jahre auf dem Gebiet des vollautomatischen Fahrens geforscht. Diese Arbeitsgruppe legte ein besonderes Augenmerk auf die Erfassung der Umgebung des Eigenfahrzeuges durch maschinelles Sehen. Im Rahmen von PROMETHEUS demonstrierte sie vollautomatisches Fahren im Realverkehr auf öffentlichen Autobahnen. Neben dem Fahren auf einem Fahrstreifen mit und ohne Vorderfahrzeug konnten auch Fahrstreifenwechsel automatisch durchgeführt werden. Die Ausführung der Fahrstreifenwechselmanöver erforderte eine Freigabe durch einen Sicherheitsfahrer. Die Arbeit von Brüdigam [32] beschreibt die für die Generierung der Manöver eingesetzten Regelungs- und Vorsteuerungsalgorithmen.

Den aktuellsten Stand der in der Arbeitsgruppe entwickelten Konzepte und Algorithmen zur Verhaltensgenerierung beschreiben die Arbeiten von Maurer [131], Pellkofer [163] und Siedersberger [189].

Maurer [131] stellt eine funktionale Systemarchitektur für „autonome“ Fahrzeuge vor. Diese orientiert sich unter anderem am Drei-Ebenen-Modell des menschlichen Verhaltens bei Ausführung von zielgerichteten sensumotorischen Tätigkeiten von Rasmussen [167]. Sie strukturiert sich in die vier Ebenen wissensbasierte Ebene, regelbasierte Ebene, 4D-Ebene und hardwarespezifische Ebene. Die wissensbasierte Ebene sorgt unter Berücksichtigung der Ziele für die Erzeugung der mittel- und langfristigen Pläne sowie die Generierung der Regelbasis für die regelbasierte Ebene. Auf der regelbasierten Ebene werden dann zur Situation und den Zielvorgaben passende Algorithmen der 4D-Ebene, auf welcher Regelungs- und Trajektorienplanungsalgorithmen angesiedelt sind, ausgewählt und aktiviert. Die hardwarespezifische Ebene sorgt dafür, dass die darüber liegenden Ebenen unabhängig von der eingesetzten Hardware sind. Zur Auswahl von Verhaltensweisen setzt Maurer Zustandsautomaten ein. Im System sind verschiedene Automatisierungsgrade realisiert, die im Betrieb umschaltbar sind. In der Querführung werden zum Beispiel Modi unterschieden, in denen die Automation einen Fahrstreifenwechsel „autonom“ ausführen kann oder diesen nur auf Kommando eines Fahrers ausführt.

In der Arbeit von Siedersberger [189] wird unter anderem das Fähigkeitsnetz zur Repräsentation der Fähigkeiten des Systems in unterschiedlichen Abstraktionsgraden und ihrer Abhängigkeiten zueinander dargestellt. Manöver und Fortbewegungsfertigkeiten sind Teil des Netzes. Die Manöver bedienen sich für die Ausführung verschiedener Fortbewegungsfertigkeiten für die Längs- und Querdynamik, die über Zustandsautomaten aktiviert werden.

Pellkofer [163] befasst sich mit der Verhaltensentscheidung für das „autonome“ Fahren. Aus dem Fähigkeitsnetz werden für die jeweilige Situation passende Manöver ausgewählt und deren Ablauf kontrolliert. Für die Auswahl der Manöver wird die Methode der Fuzzy Logik genutzt.

Einige weiterführende Überlegungen zur Einbindung eines Fahrers in das System werden von Dickmanns [46] vorgestellt. Es sei „eine Begriffsbildung im Einklang mit dem Alltagsgebrauch bei Menschen anzustreben“. Zur Ermöglichung einer partnerschaftlichen Interaktion mit der Automation sei eine „interne [...] explizite Repräsentation der Wahrnehmungs- und Verhaltensfähigkeiten erforderlich“. Dickmanns ist der Ansicht, dass auf dem „Gebiet des Zusammenspiels von Mensch und kognitionsfähigem Fahrzeug [...] in Zukunft in erheblichem Umfang Forschungsarbeiten zu leisten“ sind [46].

Die Arbeitsgruppe von Onken an der Universität der Bundeswehr München beschäftigte sich mit der Integration von Fahrer und Automation. Schreiner [182] beschreibt in diesem Kontext ein System zur automatischen Fahrzeugführung, das seinen Fahrstil einem Fahrer individuell anpassen kann. Der Fahrer fährt in einer Modellbildungsphase manuell mit dem System, um fahreradaptive Kennlinien und Parameter zu gewinnen. Auf dieser Basis erfolgt in einer anschließenden Modellbetriebsphase die an den Fahrstil des Fahrers angepasste automatische Fahrzeugführung. Um in einer Situation eine Handlungsalternative (zum Beispiel Überholen oder Folgefahren) auszuwählen, werden diese hinsichtlich ihrer Konsequenzen bewertet und diejenige Alternative mit der besten Bewertung wird ausgewählt. Dazu wird die aus der Psychologie bekannte „Erwartung-mal-Wert-Theorie“ genutzt.

Beispiel 2: Fraunhofer-Institut für Informations- und Datenverarbeitung

Die Arbeitsgruppe um Nagel vom Fraunhofer-Institut für Informations- und Datenverarbeitung in Karlsruhe (seit 2010 Fraunhofer-Institut für Optronik, Systemtechnik und Bildauswertung) demonstrierte unter anderem in PROMETHEUS vollautomatisches Fahren auf der Autobahn und auf einer Landstraße [146]. Dabei wurden unter anderem Abbiege- und Fahrstreifenwechselmanöver durchgeführt. Des Weiteren erfolgte die Demonstration von Fahrten im Stadtverkehr (siehe zum Beispiel Heimes [87]). Ein Schwerpunkt der Arbeiten lag auf der Umfelderkennung durch maschinelles Sehen.

Ausgehend von den Erfahrungen beim Aufbau der vollautomatischen Fahrzeuge [146] wurden Ansätze zur Beschreibung des Fahrens basierend auf Manövern entwickelt. Nagel und Enkelmann [145] stellen eine Menge von 17 Manövern vor: Anfahren, Straßenzug folgen, Kreuzung überqueren, Fahrstreifenwechsel links/rechts, links/rechts abbiegen, am rechten Straßenrand anhalten, rückwärts fahren, Kehre links/rechts, Fahrtrichtung umkehren, Annähern an Gegenstand vor dem Fahrzeug, Überholen, vor Gegenstand anhalten, links/rechts an Gegenstand vorbeifahren, hinter anfahrendem Fahrzeug anfahren, Fahrzeug folgen, in Parklücke einfahren, aus Parklücke herausfahren. Diese Menge soll ausreichen, eine Fahrt ohne Berücksichtigung von Notmanövern sowohl auf der Autobahn als auch im Stadtverkehr nachzubilden [145]. Mittels dieser Manöver wird eine Autobahnfahrt in Zustandsübergangsdiagrammen beschrieben [142]. Des Weiteren wird eine Anwendung für das Anfahren einer Tankstelle gezeigt [146]. Der Formalismus zur Beschreibung von Verhalten wurde weiterentwickelt zu Situationsgraphenbäumen [144]. Hier werden einzelne Situationsschemata zu verhaltensbeschreibenden Graphen verknüpft. Ein Situationsschema besteht aus einem Zustandsschema und einem Handlungsschema und verknüpft so eine Handlung mit einem Zustand. Für die Zustandserkennung wird die unscharfe, metrisch-temporale Logik (UMTL) eingesetzt. Neben der Beschreibung des Verhaltens sollen Situationsgraphenbäume auch zur Planung von Handlungsfolgen genutzt werden können [144, 11].

Einen auf neun Manövern basierenden Ansatz zur Realisierung automatischer Fahrzeugführung stellt Tölle vor [197]. Auf der Grundlage der 17 von Nagel und Enkelmann [145] beschriebenen Manöver spezifiziert er die Manöver Anfahren, Folgen, Annähern, Passieren, Kreuzung überqueren, Fahrspurwechsel, Abbiegen, Umkehren und Parken. Die Menge reiche aus, „um eine Fahrt im öffentlichen Straßenverkehr vollständig nachzubilden“ [197, S. 7]. Für jedes Manöver werden Start- und Endbedingungen festgelegt. Zur Bestimmung der Trajektorien werden Sigmoid-Funktionen und deren Ableitungen eingesetzt. Die Auswahl und die Parametrierung der Funktion werden durch das Manöver bestimmt. Im Rahmen der Arbeit erfolgt keine Einbindung des Fahrers in das System. Tölle sieht jedoch den Anwendungsbereich des Systems nicht im vollautomatischen Fahren, der „maschinelle Kopilot ist Teil eines Fahrer-Assistenzsystems“ [197, S. XIII]. Als Voraussetzung, „um einen Fahrer im Straßenverkehr aktiv zu unterstützen, d. h. teilweise oder dauernd die Führung des Fahrzeuges zu übernehmen“ postuliert er, „dass ein maschineller Kopilot in der Lage sein muss, eine vom Fahrer durchgeführte Fahrt [...] nachzuvollziehen und automatisch nachzufahren“ [197, S. 6].

Beispiel 3: DARPA Grand Challenge

Die DARPA (**D**efense **A**dvanced **R**esearch **P**rojects **A**gency, eine für Forschungsprojekte zuständige Behörde des Verteidigungsministeriums der USA) veranstaltete in den letzten Jahren drei sogenannte Grand Challenges. Dadurch wurde die Entwicklung im Bereich der vollautomatischen Fahrzeuge stark forciert. Viele Gruppen haben sich mit dem Aufbau von Fahrzeugen für die Wettbewerbe befasst. In den ersten beiden Wettbewerben 2004 und 2005 musste eine Strecke auf unbefestigtem Terrain durch die Wüste in Nevada vollautomatisch zurückgelegt werden. Während bei der ersten Auflage kein Fahrzeug die Strecke erfolgreich absolvieren konnte, erreichte 2005 das Fahrzeug Stanley der Stanford University [194] als Erstes das Ziel. Im Jahr 2007 musste ein innerstädtischer Kurs in Kalifornien mit verschiedenen Aufgaben vollautomatisch absolviert werden. Der Wettbewerb wurde vom Tartan Racing Team der Carnegie Mellon University mit dem Fahrzeug Boss gewonnen [199]. Im Gegensatz zu den ersten beiden Wettbewerben gab es hier neben den automatischen Fahrzeugen von Fahrern gesteuerte Fahrzeuge, um Verkehr zu simulieren. Die automatischen Fahrzeuge mussten unter anderem Fahrstreifenwechsel, Abbiegen an Kreuzungen, Einfädeln in fließenden Verkehr, Wenden in blockierten Straßen und Einparken auf einem Parkplatz absolvieren. Aufgrund der Regeln des Wettbewerbs waren die teilnehmenden Fahrzeuge für einen Geschwindigkeitsbereich bis 30 Meilen/Stunde (ca. 48 km/h) ausgelegt.

Zur Verhaltensgenerierung wurden verschiedene Methoden eingesetzt. Bei Boss [199] wird von einem „Behavioral Subsystem“ eine Zielposition auf einem Fahrstreifen auf der Straße als Ziel vorgegeben. Anschließend wird eine Bahn (zum Beispiel in der Mitte des Fahrstreifens) geplant, die dieses Ziel erreicht. Auf dieser Basis werden mehrere Trajektorien generiert, die der Bahn mit verschiedenen lateralen Abweichungen folgen und dieses eine Manöver realisieren könnten. Durch eine Bewertungsfunktion wird die beste Trajektorie ausgewählt und von Reglern umgesetzt. Das System des Fahrzeuges Junior [138] berechnet mehrere Trajektorien nicht nur für ein Manöver, sondern zum Beispiel jeweils für ein Fahrstreifenwechsel- und Fahrstreifenfolgemanöver. Es wird ebenfalls mittels einer Kostenfunktion die beste Trajektorie ausgewählt. Beim Fahrzeug des Teams CarOLO der TU Braunschweig [168] erfolgt die Verhaltenszeugung mittels einer DAMN Architektur (**D**istributed **A**rchitecture for **M**obile **N**avigation). Die Trajektorie wird dabei in Querrichtung durch eine je nach Aktivierung gewichtete Überlagerung und in Längsrichtung durch eine Minimumbildung verschiedener Verhaltensweisen erzeugt. Das Team AnnieWAY nutzt einen hierarchischen Zustandsautomaten um die Manöver zu planen [80, 109]. Jeder Zustand modelliert ein bestimmtes Fahrverhalten. Ein unterlagerter Algorithmus prüft die durch den Zustandsautomaten bestimmte Bahn auf Kollisionsfreiheit und passt sie im Falle einer Kollision entsprechend an [109].

Auf der Grundlage der Arbeiten zur Teilnahme an den Wettbewerben beschäftigen sich verschiedene Arbeitsgruppen weiterhin mit der Thematik des vollautomatischen Fahrens. Eine Hauptzielrichtung ist, vollautomatisch Missionen im öffentlichen Stadtverkehr absolvieren zu können. Die Technische Universität Braunschweig befasst sich mit dieser Thematik innerhalb des Projektes Stadtpilot [208, 209]. Eine erste Ergebnisdemonstration erfolgte im Herbst 2010 in Braunschweig [156]. Die Arbeiten der Gruppe um Prof. Thrun von der Stanford University zielen ebenfalls auf den öffentlichen Stadtverkehr ab [124].

Beispiel 4: KogniMobil

Die Deutsche Forschungsgemeinschaft förderte von 2006 bis 2010 den Sonderforschungsbereich / Transregio 28: „Kognitive Automobile“ (KogniMobil). Die Universität Karlsruhe, die Technische Universität München, die Universität der Bundeswehr München und das Fraunhofer Institut für Informations- und Datenverarbeitung arbeiteten darin bei der Entwicklung „autonomer“ Fahrzeuge zusammen. Eine Gruppe aus diesem Sonderforschungsbereich nahm als Team AnnieWAY an der DARPA Urban Challenge teil [195] (siehe oben). Im Rahmen des Projektes wurden verschiedene Versuchsfahrzeuge aufgebaut. Es erfolgte keine Berücksichtigung der Einbeziehung eines Fahrers in das System.

Für das Fahrzeug MUCCI (**M**unich's **C**ognitive **C**ar **I**nnovation) wurde unter anderem auf den Arbeiten der Gruppe um Dickmanns (siehe oben) aufgebaut [195]. Die Erzeugung des Verhaltens basiert auf longitudinalen und lateralen Fahrzeugführungsfähigkeiten. Für die Auswahl der Manöver wird die Methode der Fuzzy Logik genutzt. Ein wichtiger Bestandteil der Forschungsaktivitäten war die Sicherheitsbewertung der geplanten Trajektorien basierend auf Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Positionen anderer Verkehrsteilnehmer [7].

Im Teilprojekt „Cognitive Behavior Decision and Path Planning“ [183] wurden Methoden für die Auswahl und Ausführung geeigneter Verhaltensweisen für das „autonome“ Fahrzeug entwickelt. Zur Erzeugung des Verhaltens wurde ein in drei Ebenen hierarchisiertes „Behavior Network“ eingesetzt. Die einzelnen Teilverhaltensweisen werden abhängig von ihrer Aktivierung zu einem Gesamtverhalten fusioniert. Diese Modellierung soll sich an menschlichen Entscheidungsprozessen orientieren [183].

Fazit

Da für das teil- und hochautomatisierte Fahren die Automation die Fähigkeit haben muss, das Fahrzeug automatisch führen zu können, bieten vollautomatische Systeme eine Vielzahl von Anregungen für die Lösung von Teilproblemen bei der Entwicklung eines teil- oder hochautomatisierten Systems. Sie bieten jedoch im Sinne der Zielsetzung der vorliegenden Arbeit keine umfassende Lösung. Es fehlt eine Einbindung des Fahrers in die Systeme mit den hier geforderten Kooperationsmöglichkeiten. Außerdem wird nur in sehr wenigen Arbeiten bei der Erzeugung des Automationsverhaltens berücksichtigt, wie sich ein menschlicher Fahrer verhalten würde. Zur Erzeugung eines kompatiblen Verhaltens (siehe Kapitel 1.4) ist dies jedoch eine entscheidende Voraussetzung.

2.2.3 Teil- und hochautomatisiertes Fahren

Frühe Ideen zum teil- und hochautomatisierten Fahren finden sich wiederum im Umfeld des Projektes PROMETHEUS. Eine Zielrichtung beim Aufbau der automatisierten Fahrzeuge im Rahmen des Projektes war die Nutzung der Vollautomation als Grundlage, um „maschinelle Ko-Piloten“ zur Unterstützung des Fahrers zu entwickeln [140]. Besonders die Arbeitsgruppe um Nagel verfolgte diesen Ansatz. Für Nagel muss ein „maschineller Ko-Pilot“, der den Fahrer unterstützen soll, die Fähigkeit haben, ein Fahrzeug automatisch führen zu können [140, 141]. Als eine Umsetzung wird ein „Warnassistent“ vorgestellt [146]. Dieser Assistent warnt den Fahrer bei der Annäherung an eine Kreuzung, damit vom Fahrer rechtzeitig eine Bremsung ausgeführt werden kann. Erfolgt keine

Reaktion durch den Fahrer, ist eine automatische Notbremsung vorgesehen. Des Weiteren werden Überlegungen vorgestellt, bei denen der Fahrer eine überwachende Funktion bei automatisch ausgeführten Manövern einnimmt [141]. Das System gibt die Kontrolle des Fahrzeuges zurück zum Fahrer, wenn es eine Situation nicht automatisch bewältigen kann. Zur Realisierung einer zu einem Kopiloten vergleichbaren Beziehung zum System wird eine kontinuierliche Kommunikation des Fahrers mit dem System gefordert [141]. Diese könne analog zur Kommunikation von Pilot und Kopilot sowohl explizit als auch implizit sein. Zur Strukturierung des „maschinellen Ko-Piloten“ schlägt Nagel, basierend auf der Überlegung wie die Fahraufgabe im Allgemeinen strukturiert ist, eine hierarchische Struktur mit vier Ebenen vor (zum Beispiel [141, 146]): „Mission Master Level“, „Navigation Level“, „Maneuver Level“ und „Control Level“. Für die Kommunikation mit dem Fahrer ist der „Mission Master Level“ zuständig. Der Fahrer kann Start- und Zielpunkt seiner Fahrt eingeben sowie Modifikationen an der geplanten Route vornehmen. Die darunter liegenden Ebenen sind für die Umsetzung der Fahrhandlungen verantwortlich. Es werden allerdings keine detaillierten Überlegungen zur Umsetzung dieser Ideen dargestellt [141, 146]. Bei dem von Heimes und Nagel [88] vorgestellten System für Stadtfahrten kann der Fahrer die automatisch ausgeführten Manöver jederzeit übersteuern. Eine tiefergehende Betrachtung der Integration des Fahrers erfolgt nicht [88]. Im Folgenden werden Arbeiten vorgestellt, welche die Integration des Fahrers detaillierter betrachten. Diese lassen sich in zwei Gruppen einordnen. Zuerst werden Systeme betrachtet, die teil- oder hochautomatisiertes Fahren auf einem Fahrstreifen ermöglichen. Diese Systeme haben die Fähigkeit, einem Fahrstreifen zu folgen sowie die Geschwindigkeit an eventuell vorhandene Vorderfahrzeuge anzupassen. Des Weiteren erfolgt die Darstellung von Systemen, welche die Fähigkeit haben, weitere Fahrmanöver, wie zum Beispiel Fahrstreifenwechsel teil- oder hochautomatisiert auszuführen. Zu dieser Gruppe ist auch das im Rahmen der vorliegenden Arbeit entstandene System zuzuordnen.

Vor der Auseinandersetzung mit einzelnen Systemen muss noch das von der Europäischen Union geförderte Projekt HAVEit (**H**ighly **A**utomated **V**ehicles for **I**ntelligent **T**ransportation, Laufzeit 2008-2011) erwähnt werden, das in der jüngeren Vergangenheit für einen maßgeblichen Fortschritt in der Entwicklung des teil- und hochautomatisierten Fahrens sorgte. Im Rahmen des Projektes wurden verschiedene Systeme für das teil- und hochautomatisierte Fahren aufgebaut, sowie grundsätzliche Strategien für die Realisierung derartiger Systeme erarbeitet [95, 96]. Es wurden sowohl Systeme zum Fahren auf einem Fahrstreifen (zum Beispiel „Temporary Auto Pilot“ [15]) als auch mit einem breiteren Manöverspektrum aufgebaut (zum Beispiel „Joint System“ [68]). Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit wurden bei der Entwicklung des „Joint System“ genutzt. Ausgewählte im Rahmen von HAVEit entwickelte Systeme werden ebenfalls im Weiteren vorgestellt.

Teil- und hochautomatisiertes Fahren auf einem Fahrstreifen

Verschiedene Projekte beschäftigen sich mit Konzepten, bei denen die Automation unter bestimmten Bedingungen die Fahrzeugführung auf einem Fahrstreifen automatisch übernehmen kann und der Fahrer dann als Rückfallebene dient. Ein Beispiel ist das KONVOI Projekt [45], in dem aus Lastkraftwagen bestehende Konvois gebildet werden. Nach dem Ankoppeln an einen vorausfahrenden Lastkraftwagen wird die Fahrzeugführung automatisch übernommen. Reichardt [169] stellt ein Konzept vor, bei dem die Automation die Fahrzeugführung auf einem Fahrstreifen auf bestimm-

ten Straßenabschnitten automatisch übernehmen kann. Er evaluiert dieses Konzept mittels einer Probandenstudie im Simulator im Hinblick auf die Übernahmefähigkeit durch den Fahrer.

Ein System zum teilautomatisierten Fahren in Stausituationen wurde im Projekt INVENT (**I**ntelligent **V**erkehr und **n**utzergerechte **T**echnik) entwickelt. Das System bietet eine Automatisierung der Längsführung analog der Funktionalität eines ACC Systems. Die Automatisierung der Querführung zielt auf das Halten des aktuellen Fahrstreifens ab. Im Rahmen des Projektes wurden verschiedene Systemausprägungen des Stauassistenten mit unterschiedlichen Automatisierungsgraden vorgestellt. In der Querführung wurden zum Beispiel Varianten mit haptischer Fahrerunterstützung und automatischer Querführung aufgebaut [1, 204]. Verschiedene Weiterentwicklungen der Systeme betreffen die Regelungsalgorithmen [205] und die Gestaltung der Mensch-Maschine-Schnittstelle [125].

Eigel [56] stellt ein im Rahmen des Projektes Aktiv (**A**daptive und **k**ooperative **T**echnologien für den **i**ntelligenten **V**erkehr) entwickeltes System vor, das integrierte Längs- und Querführung in einem Geschwindigkeitsbereich bis 180 km/h bietet. Der Fahrer interagiert mit diesem System mittels eines Bedienhebels. Die Querführung des Systems bietet eine Anpassung der Querposition des Eigenfahrzeuges im aktuellen Fahrstreifen, wenn zum Beispiel Hindernisse in den Fahrstreifen hineinragen.

Im Rahmen von HAVEit wurde von Volkswagen der „Temporary Auto Pilot“ entwickelt, der teilautomatisiertes Fahren auf einem Fahrstreifen auf Autobahnen oder autobahnähnlichen Straßen ermöglicht [15]. Das Gesamtkonzept des „Temporary Auto Pilot“ umfasst verschiedenen Modi, die mittels eines Transitionskonzeptes gewechselt werden können. Andere in HAVEit entwickelte Systeme zielen auf teilautomatisiertes Fahren auf einem Fahrstreifen in Baustellen sowie in Stausituationen ab [96]. Bei der Abschlussdemonstration wurden diese Systeme erfolgreich öffentlich vorgestellt.

Die ersten Ansätze von teilautomatisiertem Fahren in Serienfahrzeugen werden durch eine Kombination der Assistenzsysteme ACC und LKAS ermöglicht. Diese Funktionalität wird zum Beispiel von Honda und Lexus angeboten [75, 77].

Teil- und hochautomatisiertes Fahren mit einem breiteren Manöverspektrum

An der Technischen Universität Darmstadt wird unter dem Titel „Conduct-by-Wire“ [212] an einem Konzept und der Realisierung von teilautomatisiertem Fahren mittels Manövereingaben gearbeitet. Der Fahrer entscheidet über die auszuführenden Manöver, die dann von der Automation ausgeführt werden. Zur Umsetzung der Manöver wird ein „Satz von Fahrfunktionen“ entwickelt, der „für jede im zugelassenen Diskursbereich auftretende Situation eine Fahrfunktion bereitstellen können“ muss [84]. Diese Fahrfunktionen bestehen „aus elementaren, verkettbaren und entweder longitudinal oder lateral wirkenden Funktionen“, von denen jeweils „genau ein Paar aus einer longitudinal und einer lateral wirkenden Funktion aktiv“ ist [83].

Ein Ansatz zum teilautomatisierten Fahren wurde auch im Projekt SPARC (**S**ecure **P**ropulsion **u**sing **A**dvanced **R**edundant **C**ontrol) [97, 98, 99] entwickelt. Die Systemarchitektur sieht hier einen „virtuellen Kopiloten“ vor, der parallel zum Fahrer arbeitet und ebenfalls Stellgrößen (Lenkwinkel und longitudinale Beschleunigung) bestimmt. Der „virtuelle Kopilot“ besteht aus einem Multiagentensystem, in dem verschiedene Regelalgorithmen arbeiten. Es werden ein zugelassener Bereich von

Stellgrößen und ein Optimum für jedes in einer Situation mögliche (und im System vorhandene) Manöver (zum Beispiel „Fahrzeug folgen“ und „Fahrzeug überholen“) berechnet. Ein Entscheidungsmodul, das diese Bereiche und Optima mit den Steueraktionen des Fahrers vergleicht, bestimmt die dem Fahrer übermittelten Rückmeldungen und das an das Fahrzeug übermittelte Steuerungskommando. Wird die Stellaktion des Fahrers als gefährlich eingestuft, so wird das Fahrzeug automatisch geführt, sonst erfolgt der Eingriff des Systems über Kräfte an einem aktiven Sidestick. Im Rahmen des Projektes wurde keine Evaluierung des Systems mit Probanden durchgeführt.

Das VW Projekt „Intelligent Car“ zielt auf teilautomatisiertes Fahren auf der Autobahn ab [14]. Die Automation hat die Fähigkeit, vollautomatisch auf der Autobahn in einem breiten Geschwindigkeitsbereich zu fahren sowie Fahrstreifenwechsel durchzuführen. Dem Fahrer wird eine überwachende Rolle zugewiesen. Des Weiteren stellt er die Rückfallebene bei einem Systemausfall dar. Die Fahrstreifenwechselmanöver müssen von ihm freigegeben werden. Die Funktionalität des Fahrzeuges wurde auf einem Testgelände demonstriert.

Eine detaillierte Vorstellung des im Projekt HAVEit entwickelten „Joint System“ [68] erfolgt an dieser Stelle nicht, da die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit bei der Entwicklung des Systems genutzt worden sind.

Fazit

Zuerst ist festzustellen, dass sich mit dem Bereich des teil- und hochautomatisierten Fahrens deutlich weniger Arbeiten beschäftigen als mit vollautomatischen Systemen und Fahrerassistenzsystemen. Dies gilt insbesondere für den Bereich der Systeme, die teil- oder hochautomatisiertes Fahren mit einem breiteren Manöverspektrum ermöglichen.

Der Großteil der Systeme basiert auf dem Prinzip der vollständigen Delegation von Aufgaben an die Automation. Der Fahrer dient bei diesen Systemen als Rückfallebene und hat die Aufgabe der Überwachung, mit der Möglichkeit das System zu übersteuern. Einige Systeme bieten die Möglichkeit der aktiven Beeinflussung der Fahrstrategie der Automation durch diskrete Eingaben des Fahrers. Da die für die Kooperation geforderte gemeinsame Handlungsplanung und gemeinsame Handlungsausführung nicht vorhanden sind, erlauben die delegativen Systeme kein kooperatives Zusammenwirken von Automation und Fahrer.

Ein Element des kooperativen Zusammenwirkens wird durch die Systeme geboten, die eine gemeinsame Handlungsausführung durch aktive Stellteile ermöglichen. Dieses sind einige Varianten des in INVENT entwickelten Stauassistenten sowie die Nutzung eines LKAS zur Realisierung des teilautomatisierten Fahrens. Erste Ansätze zu einem kooperativen Konzept bietet der aus SPARC stammende „virtuelle Kopilot“ durch die Bestimmung der Aktion der Automation auf der Grundlage der in der aktuellen Situation für die Automation möglichen Manöver und der Steueraktion des Fahrers. Ein kooperatives Zusammenwirken im in der Zielsetzung dieser Arbeit geforderten Umfang wird jedoch von keinem dieser Systeme geboten, da nur Teilaspekte adressiert werden.

Des Weiteren erfolgt eine Berücksichtigung des Fahrverhaltens eines menschlichen Fahrers nur bei wenigen der vorgestellten Systeme. Als eine Ausnahme ist das Projekt „Conduct-by-Wire“ zu nennen. Ein Ziel des Projektes ist es, die Einteilung der Manöver der Automation der von einem Fahrer gewählten Einteilung anzugleichen [181].

Die angewandten Methoden für die technischen Umsetzungen und die von den beschriebenen Ansätzen aufgezeigten Möglichkeiten zur Kommunikation mit teil- und hochautomatisierten Systemen bieten jedoch eine Vielzahl von Anregungen zur Gestaltung der kooperativen Automation sowie zur Lösung von Teilproblemen beim Aufbau des Systems.

3 Konzept der kooperativen Automation zur teil- und hochautomatisierten Fahrzeugführung

Im folgenden Kapitel wird das Konzept der kooperativen Automation zur teil- und hochautomatisierten Fahrzeugführung grundlegend vorgestellt. Die Betrachtungen in diesem Kapitel sind abstrakt gehalten und somit unabhängig von einer bestimmten Umsetzung. Die Definition von kooperativer Automation zur teil- und hochautomatisierten Fahrzeugführung bildet die Basis der Überlegungen (Kapitel 3.1). Es schließt sich die detaillierte Ausarbeitung des Konzeptes an. Diese erfolgt anhand der strukturierten Betrachtung einzelner Kooperation ausmachender Elemente (Kapitel 3.2). Abschließend wird das Potential des Konzeptes hinsichtlich der Vermeidung von Problemen im Zusammenwirken von Fahrer und Automation sowie des Gewinnes von Sicherheit und Komfort analysiert (Kapitel 3.3).

Erste Überlegungen zum Konzept der kooperativen Automation wurden vom Autor dieser Arbeit bereits in [129] vorgestellt. Das vorliegende Kapitel basiert auf diesen Überlegungen.

3.1 Definition

Der Begriff Kooperation stammt aus dem Lateinischen und bedeutet allgemein Zusammenarbeit [3]. Die kooperative Automation wird als eigener Akteur definiert, der in Zusammenarbeit mit dem Fahrer das Fahrzeug führt. Die Auffassung einer Automation als einem eigenen Akteur erfolgt zum Beispiel auch in Christoffersen und Woods [39] sowie Young et al. [213]. Diese Betrachtungsweise impliziert, dass die gesamte Funktionalität der im Fahrzeug vorhandenen Automation in einem integrierten System vorliegt. Nur auf diese Weise kann der Fahrer die Automation als einen homogenen Akteur wahrnehmen. Anderenfalls würde die vorhandene Automation als eine parallele Zusammenstellung verschiedener Einzelsysteme wirken. Abbildung 3.1 zeigt den Fahrer und die Automation als Partner, die gemeinsam die Fahrzeugführungsaufgabe erfüllen. Die Grundlage des Konzeptes bildet nicht die Zuordnung von (Teil-)Funktionen zur Automation oder zum Fahrer, sondern die Gestaltung der Zusammenarbeit der beiden Partner für die gemeinsame Aufgabenbearbeitung.

Die Automation unterstützt bei der Kooperation aktiv die Harmonisierung der Fahrstrategien von Automation und Fahrer zu einer gemeinsamen Strategie. Die Planung dieser gemeinsamen Strategie erfolgt durch kontinuierliche Interaktion zwischen den beiden Akteuren (siehe Abbildung 3.1). Die Automation hat die Fähigkeit, ihre eigene Strategie zu ändern und diese der Strategie des Fahrers anzupassen. Ebenso muss berücksichtigt werden, dass auch der Fahrer seine Strategie ändern und der Strategie der Automation anpassen kann. Parallel zur gemeinsamen Strategieplanung wird die Ausführung des auf diese Weise gemeinsam erstellten Handlungsplanes ebenfalls von Fahrer und Automation gemeinsam übernommen (siehe Abbildung 3.1).

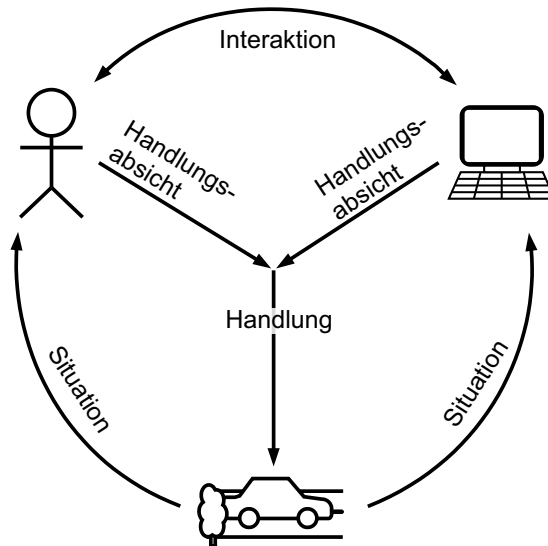


Abbildung 3.1: Fahrer und Automation führen gemeinsam das Fahrzeug in der Umwelt (nach Flemisch et al. [69])

3.2 Kooperation ausmachende Elemente

Auf der Grundlage der Definition erfolgt im Weiteren die Ausarbeitung des Konzeptes anhand der detaillierten Beleuchtung einzelner im Kontext der teil- und hochautomatisierten Fahrzeugführung Kooperation ausmachender Elemente. Die mittels dieser Elemente erfolgende Gliederung in Teilkonzepte ermöglicht die Strukturierung der einzelnen Überlegungen. Abbildung 3.2 zeigt eine Übersicht der Elemente. Die Verknüpfungen der Elemente visualisieren die Relevanz der durch ein Element umfassten Überlegungen für die Ausarbeitung eines anderen Elementes.

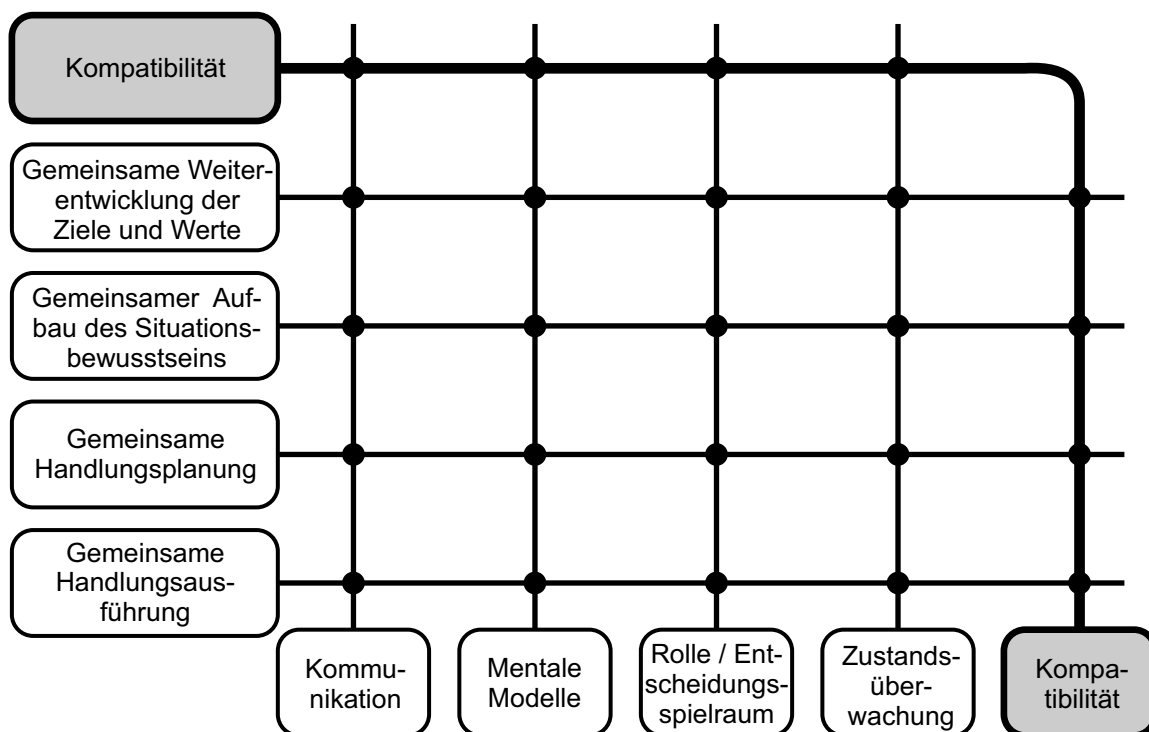


Abbildung 3.2: Übersicht der Kooperation ausmachenden Elemente

Die Kompatibilität (Kapitel 3.2.1) von Fahrer und Automation bildet einen Leitgedanken, dessen Berücksichtigung bei sämtlichen Fragestellungen bezüglich der kooperativen Automation relevant ist. Er ist somit bei der Gesamtheit der übrigen Elemente von Bedeutung (siehe Abbildung 3.2).

Die horizontalen Elemente (siehe Abbildung 3.2) adressieren Aufgaben, deren gemeinsame Bearbeitung bei der Handlungsgenerierung die Kooperation ausmacht. Dieses sind im Einzelnen die gemeinsame Weiterentwicklung von Zielen und Werten (Kapitel 3.2.4), der gemeinsame Aufbau des Situationsbewusstseins (Kapitel 3.2.4), die gemeinsame Handlungsplanung (Kapitel 3.2.2) sowie die gemeinsame Handlungsausführung (Kapitel 3.2.3). Diese Gestaltung der Handlungsgenerierung als eine Zusammenarbeit des Fahrers mit der Automation bildet den Kern des Konzeptes der kooperativen Automation. Von Bedeutung für die horizontalen Elemente sind neben der Kompatibilität die vertikalen Elemente.

Die vertikalen Kooperation ausmachenden Elemente (siehe Abbildung 3.2) adressieren Überlegungen, die die gemeinsame Aufgabebearbeitung unterstützen oder ermöglichen und daher für diese relevant sind. Eine gezielte Ausarbeitung der Kommunikation zwischen Fahrer und Automation (Kapitel 3.2.6) ist zum Beispiel für eine detaillierte Abstimmung der Partner im Rahmen der gemeinsamen Aufgabebearbeitung notwendig. Mentale Modelle (Kapitel 3.2.5) beschreiben die individuelle kognitive Repräsentation des einen Partners bei dem jeweils anderen. Dadurch bilden sie zum Beispiel eine Grundlage für das von dem einen Partner erwartete Verhalten des anderen Partners bei der gemeinsamen Aufgabebearbeitung. Die Ausarbeitung der Rolle und des damit verbundenen Entscheidungsspielraumes (Kapitel 3.2.7) adressieren die gezielte Gestaltung der individuellen Rechte und Pflichten der Partner bei der gemeinsamen Aufgabebearbeitung. Die Zustandsüberwachungen des Fahrers und der Automation (Kapitel 3.2.8) dienen zum Beispiel der Festlegung des aktuellen Einflusses der Partner bei der gemeinsamen Aufgabebearbeitung zur Gewährleistung der Sicherheit des Fahrers. Die Betrachtung der Kompatibilität ist ebenso wie bei den horizontalen Elementen für die Ausarbeitung der vertikalen Elemente von hoher Relevanz.

3.2.1 Kompatibilität

Zur Ermöglichung einer kooperativen Beziehung zwischen Fahrer und Automation muss die Automation möglichst kompatibel zum Fahrer gestaltet sein. Die Kompatibilität beschreibt die Passung zwischen den beiden Akteuren. Kompatibilität ist nicht gleichbedeutend mit Ähnlichkeit: Stecker und Steckdose sind nur begrenzt ähnlich, aber kompatibel. Zwei Stecker haben eine hohe Ähnlichkeit, würden aber nicht zueinander passen (siehe Abbildung 3.3). Im gleichen Sinne müssen auch Fahrer und Automation nicht ähnlich, aber kompatibel sein, um gewinnbringend zusammenarbeiten zu können. Eine hohe Kompatibilität sorgt dafür, dass die Interaktion mit der Automation für den Fahrer einfach zu begreifen ist und die Aktionen der Automation in einer bestimmten Situation für ihn leicht zu verstehen sind (siehe auch [34]). Ist die Automation nicht kompatibel gestaltet, wird die gewinnbringende Zusammenarbeit der beiden Akteure stark erschwert. Der Fahrer muss einen beachtlichen Teil der ihm zur Verfügung stehenden Ressourcen für eine Übersetzungsleistung nutzen, um mit der Automation interagieren und um deren Aktionen nachvollziehen zu können.

Kompatibilität von Fahrer und Automation kann in innere und äußere Kompatibilität differenziert werden (siehe auch [66]). Äußere Kompatibilität beschreibt die Passung der äußeren Systemgrenzen

des Fahrers (zum Beispiel Augen, Ohren, Hände) mit den äußeren Systemgrenzen der Automation (Mensch-Maschine-Schnittstelle). Dazu zählen der Einsatz kompatibler Stellteile und Anzeigen (siehe Abbildung 3.4). Innere Kompatibilität bezeichnet die Passung der inneren Subsysteme des Fahrers mit den inneren Subsystemen der Automation (siehe Abbildung 3.5). Nur wenn innere und äußere Kompatibilität bei der Entwicklung gleichermaßen berücksichtigt werden, ist der Aufbau einer kooperativen Automation möglich.



Abbildung 3.3: Kompatibilität von Stecker und Steckdose



Abbildung 3.4: Äußere Kompatibilität am Beispiel von Computermouse und Hand

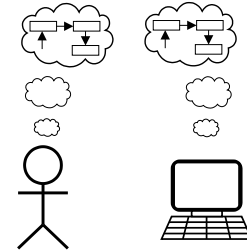


Abbildung 3.5: Kognitive Kompatibilität als Teil der inneren Kompatibilität

Innere Kompatibilität lässt sich differenzierter betrachten. Ein Element bildet die kognitive Kompatibilität. Diese beschreibt die Kompatibilität der Organisation der kognitiven Bearbeitung der Aufgabe (siehe Abbildung 3.5). Dieses betrifft zum Beispiel eine Modularisierung, Hierarchisierung oder eine zeitliche Einteilung verschiedener zu erfüllender Teilaufgaben. Um eine weitreichende kognitive Kompatibilität zu erreichen, muss diese bei der Erstellung der Struktur der Automation beachtet werden. Durch ein späteres Hinzufügen eines Übersetzungsmoduls kann nur eine oberflächliche Kompatibilität mit begrenztem Umfang erreicht werden.

Verschiedene Autoren beschreiben ebenfalls in eine ähnliche Richtung deutende Ansätze. Für Fuchs-Frohnhofen et al. [71] ist ein System kognitiv kompatibel, wenn die Struktur der Mensch-Maschine-Schnittstelle zur kognitiven Struktur des Nutzers passt. Auch Coll und Coll [40] beschreiben mit dem Konzept des „cognitive match interface design“ einen verwandten Ansatz. In diesem Rahmen fordern sie, die Arbeitsweise des Systems und seine Interaktion mit dem Nutzer derart zu gestalten, dass sie dem Ablauf der Denkprozesse des Nutzers gleichen („making the system operate and interact with the user in a manner which parallels the flow of the user’s own thought processes“ [40]). Herczeg [89] fordert ebenfalls „die Herstellung einer Modellkongruenz (direkte Abbildbarkeit) der verschiedenen Handlungs- bzw. Artikulationsebenen bei Fahrer und Maschine“.

Weitere Aspekte der inneren Kompatibilität sind die Kompatibilität der Ziele, Werte und Methoden zur Aufgabenbearbeitung. Durch diese werden die Auswahl und Eigenschaften der Handlungen der Akteure bestimmt. Kompatible Ziele, Werte und Methoden sind eine Voraussetzung, um kompatible Handlungen zu erreichen.

Die Ziele des Fahrers bilden die Grundlage für Entscheidungen zwischen verschiedenen Handlungsalternativen (siehe zum Beispiel [103]). Er versucht mittels seiner Entscheidungen die Ziele zu einem für ihn hinreichenden Grad zu erfüllen. Beispiele für mögliche Ziele im Straßenverkehr sind: schnell Vorwärtskommen, sicher Vorwärtskommen oder Beachten der Verkehrsregeln [101]. Das Wertesystem des Fahrers bestimmt die Bedeutung (zum Beispiel: gut oder schlecht, angenehm oder unangenehm) von einzelnen Sachverhalten im Straßenverkehr sowie von Eigenschaften seiner

Handlungen für ihn. Neben den sich daraus ergebenden abstrakten Betrachtungen bildet sich das Wertesystem des Fahrers auch in konkreten Zahlenwerten ab. Beispiele sind hier für den Fahrer angenehme oder maximal akzeptierte Beschleunigungen.

Die Methode beschreibt in diesem Kontext die Art und Weise, in der ein Fahrer bestimmte für die Fahrzeugführung benötigte Teilaufgaben ausführt. Die Betrachtung der Methode bezieht sich in diesem Kontext auf grundsätzliche Wirkzusammenhänge, nicht auf eine detaillierte Betrachtung kognitionspsychologischer Mechanismen. Ist zum Beispiel eine bestimmte Eigenschaft der Situation für die Handlung des Fahrers relevant, muss eine kompatible Methode der Automation diese Eigenschaft ebenfalls berücksichtigen und eine kompatible Auswirkung auf die erzeugte Handlung bewirken.

Die Kompatibilität der Handlungen bezieht sich sowohl auf Stellaktionen (zum Beispiel am Lenk-
rad) als auch auf die eigentliche Ausführung der Fahrmanöver. Die Notwendigkeit der Kompatibilität der Manöver beschreiben auch Nagel et al. [144]: „Ein FAS [Fahrerassistenzsystem], das mit der Ausführung eines bestimmten Fahrmanövers beauftragt worden ist, muss einen Bewegungsablauf des betreffenden Fahrzeuges herbeiführen, der [...] von Menschen mit demselben Begriff assoziiert wird“. Dickmanns [46] deutet durch die Anforderung, dass von der Automation ausgeführte Manöver für den „Fahrer leicht zu interpretieren“ sein müssen, in eine ähnliche Richtung.

Für die kooperative Automation bildet die Kompatibilität aufgrund ihrer aufgezeigten Anwendbarkeit in den verschiedensten zur Gestaltung der Zusammenarbeit von Fahrer und Automation relevanten Bereichen einen Leitgedanken. Bei der weiteren Ausarbeitung der einzelnen Kooperation ausmachenden Elemente wird die Kompatibilität daher immer wieder aufgegriffen.

3.2.2 Gemeinsame Handlungsplanung

Die Automation muss es ermöglichen, die Handlungsplanung gemeinsam mit dem Fahrer in einer partnerschaftlichen Beziehung durchzuführen. Das Ziel des Vorganges der gemeinsamen Handlungsplanung ist die Erstellung eines gemeinsamen Handlungsplanes, mit dem beide Partner einverstanden sind. Im Kontext der Fahrzeugführung sind die zu planenden Handlungen Manöver. Die Idee eines gemeinsamen Handlungsplanes von Fahrer und Automation wird auch von Hoc [94] genannt.

Grundlage für die gemeinsame Handlungsplanung ist die kognitive Kompatibilität der Automation. Nur wenn die Aufgabenbearbeitung kompatibel strukturiert ist, kann in den verschiedenen Verarbeitungsstufen mittels expliziter Kommunikation die gemeinsame Strategieentwicklung erfolgen. Kompatible Ziele, Werte und Methoden ermöglichen von Beginn an die Erzeugung kompatibler Handlungsvorschläge und minimieren so den Abstimmungsbedarf.

Um gemeinsam einen Plan erstellen zu können, benötigt die Automation die Fähigkeit, Kompromisse zu schließen. Die Grundlage dafür ist das Wissen der Automation, welche Handlungen von ihr in der betrachteten Situation durchführbar sind. Des Weiteren muss die Automation eine Bewertung durchführen, um darzustellen, was die von ihr präferierte Handlung ist. In der Kommunikation mit dem Fahrer kann auf dieser Basis der Plan für eine gemeinsame Handlung bestimmt werden, der einen Kompromiss aus dem präferierten Plan des Fahrers und dem der Automation darstellt. Neben der Möglichkeit, die grundsätzliche Auswahl der geplanten Handlung gemeinsam zu bestimmen,

ist die Möglichkeit der Anpassung einer bestimmten geplanten Handlung essentiell. Dazu müssen dem Fahrer verschiedenste Möglichkeiten zur Anpassung bzw. Parametrierung der konkreten Ausgestaltung einer geplanten Handlung gegeben werden. Als Grundlage dafür dient ein von der Automation bestimmter Anpassungsspielraum, der den aus ihrer Sicht zulässigen Bereich bestimmter Handlungsparameter oder des Handlungsplanes selbst festlegt. Des Weiteren ist eine aus Sicht der Automation optimale Lösung zu bestimmen, die die präferierte Ausgestaltung der Handlung darstellt. Diese Möglichkeit, den Plan durch explizite Kommunikation gemeinsam zu bestimmen, kann auch als Adaptierbarkeit der Automation durch den Fahrer bezeichnet werden.

Neben der Möglichkeit der gemeinsamen Planentwicklung durch eine direkte Abstimmung mit dem Fahrer sollte die Automation die Fähigkeit haben, aufgrund von anderen Einflüssen ihren Plan anzupassen. Dazu zählt zum Beispiel die Beobachtung des aufgrund der gemeinsamen Handlungsausführung vom Fahrer mitbeeinflussten Zustandes des Fahrzeuges in der Umgebung. Auch weitere Formen der Fahrerabsichtserkennung (siehe zum Beispiel [115]) bieten eine gute Möglichkeit, um direkt fahrerangepasste Handlungspläne in die gemeinsame Handlungsplanung einzubringen. Dieses Verhalten lässt sich durch den Aspekt der Adaptivität der Automation beschreiben.

Ebenso wie die Automation die Fähigkeit hat, für die gemeinsame Planentwicklung ihre präferierte Strategie anzupassen, kann der Fahrer seine Strategie anpassen. Dies tritt zum Beispiel auf, wenn er aufgrund eines unvollständigen Situationsbewusstseins zunächst einen Plan präferiert, der objektiv nicht durchführbar ist. Durch die Automation würde der Fahrer auf diesen Sachverhalt aufmerksam gemacht und könnte daraufhin seinen Plan ändern. Diese Adaptivität des Fahrers muss bei der Gestaltung der Automation Berücksichtigung finden. Aber auch unabhängig von der Betrachtung des Anlasses, den der Fahrer für eine Änderung seiner präferierten Strategie hat, muss die Automation eine jederzeitige Unterbrechbarkeit eines Handlungsplanes und eine gemeinsame Neuplanung ermöglichen.

Die gemeinsame Handlungsausführung wird durch einen gemeinsam erstellten Handlungsplan erheblich vereinfacht, da die aufgrund von verschiedenen Plänen bei der Handlungsausführung auftretenden negativen Interferenzen vermieden werden können.

3.2.3 Gemeinsame Handlungsausführung

Bei der gemeinsamen Handlungsausführung wird die Fahrzeugkontrolle durch Fahrer und Automation gemeinsam ausgeübt. Beide Partner können somit auf die Stellgrößen des Fahrzeuges einwirken und zur ausgeführten Handlung beitragen. Es können hier auch abstrahierte Größen gewählt werden, die von unterlagerten Regelungen auf die eigentlichen Stellgrößen des Fahrzeuges umgesetzt werden. Das Ziel ist es, den Fahrer weiterhin in den Regelkreis der Fahrzeugführung einzubeziehen. Die Idee einer gemeinsamen Handlungsausführung von Fahrer und Automation wird zum Beispiel auch durch das Konzept „Shared Control“ von Griffiths und Gillespie [82] beschrieben.

Die Kontrollanteile der Partner und damit die Anteile an der gemeinsamen Handlungsausführung sollten nicht statisch, sondern variabel sein. Dabei kann eine Verschiebung der Anteile entweder durch die Automation oder den Fahrer initiiert werden. Somit bietet sich die Möglichkeit, situationsabhängig eine optimale Aufteilung mit dem Ziel eines größtmöglichen Sicherheits- und Komfortgewinnes für den Fahrer zu nutzen.

Neben einer Verschiebung der Kontrollanteile muss für den Fahrer auch die Möglichkeit gegeben sein, die Automation zu übersteuern und damit seine Handlungsabsicht gegen die der Automation durchzusetzen. Diese Übersteuerbarkeit kann je nach konkreter Rollendefinition der Automation in bestimmten Situationen eingeschränkt werden.

Die Automation muss für die gemeinsame Handlungsausführung so gestaltet sein, dass sie mit den parallel vom Fahrer auf das Fahrzeug wirkenden Eingaben (aus regelungstechnischer Sicht Störgrößen) umgehen kann. Es darf zum Beispiel aufgrund dieser Eingaben nicht zur Bestimmung von die Fahrzeugführung destabilisierenden Stellgrößen kommen. Des Weiteren sind Zustände zu berücksichtigen, die das Fahrzeug nicht erreichen könnte, wenn die Automation dieses alleine führen würde. Bei der Automationsentwicklung muss somit explizit berücksichtigt werden, dass ein zweiter Akteur auf das Fahrzeug wirken kann.

Um Stellgrößen einstellen zu können, muss ein Stellteil (zum Beispiel ein Lenkrad) im Fahrzeug vorgesehen werden, an welchem der Fahrer Stellaktionen tätigen kann. Für das Tätigen von Stellaktionen muss es für den Fahrer möglich sein, die von der Automation getätigten Stellaktionen wahrzunehmen. Nur so lassen sich abgestimmte Stellaktionen generieren. Eine gute Möglichkeit zur Realisierung bieten aktive Stellteile, da hier die Automation mittels eines Aktors auf das Stellteil einwirken kann und so ihre Stellaktionen ausdrücken kann. Diese von der Automation getätigten Stellaktionen müssen mit denen des Fahrers kompatibel sein. Ist dies nicht der Fall, so kommt es trotz eines gemeinsamen Planes zu negativen Interferenzen bei der gemeinsamen Handlungsausführung. Bei zu starken negativen Interferenzen wird die gemeinsame Handlungsausführung unmöglich.

3.2.4 Gemeinsame Weiterentwicklung der Ziele und Werte sowie gemeinsamer Aufbau des Situationsbewusstseins

Der weiteren Verbesserung der gemeinsamen Handlungsplanung und -ausführung dient die Zusammenarbeit bei der Bearbeitung der diesen Schritten vorgelagerten Aufgaben im Verlauf der Handlungsgenerierung. So kann bereits eine Abstimmung zwischen Fahrer und Automation bezüglich der Grundlagen der gemeinsamen Handlungsplanung und -ausführung erfolgen. Diese Grundlagen sind die Ziele und Werte sowie das Situationsbewusstsein der Partner. Die Ideen von gemeinsamen Zielen und eines gemeinsamen Situationsverständnisses werden auch von Hoc [94] angeführt.

Die gemeinsame Weiterentwicklung der Ziele und Werte der Partner bildet eine langfristig angelegte Tätigkeit. Damit diese ermöglicht wird, müssen kompatible Ziele und Werte als Ausgangspunkt vorhanden sein. Das Ziel ist, auf diese Weise die Kompatibilität der Ziele und Werte weiter zu erhöhen. Eine Möglichkeit zur Weiterentwicklung der Ziele und Werte der Automation ist die Nutzung von expliziter Kommunikation mit dem Fahrer. Weitere Möglichkeiten bieten die Beobachtung des Fahrstils des Fahrers, wenn dieser über einen hohen Kontrollanteil verfügt sowie die Sammlung von konträren Ansichten des Fahrers, die dieser zum Beispiel bei der gemeinsamen Handlungsplanung zum Ausdruck bringt. Bei der gemeinsamen Weiterentwicklung der Ziele und Werte ist auch zu beachten, dass sich die Ziele und Werte des Fahrers ändern können. Dies kann aufgrund des Einflusses der Automation geschehen, was zu einer Erhöhung der Kompatibilität führen kann.

Es muss aber auch berücksichtigt werden, dass andere Einflüsse ebenfalls die Ziele und Werte des Fahrers ändern können, wodurch eher keine Erhöhung der Kompatibilität bewirkt wird.

Die Zusammenarbeit beim Aufbau des Situationsbewusstseins zielt auf das Erreichen eines gemeinsamen Situationsbewusstseins bei den Partnern ab. Die Voraussetzung für die Zusammenarbeit bilden kompatible Inhalte des Situationsbewusstseins von Fahrer und Automation. Das Ziel dieses gemeinsamen Abbildes der Umwelt ist es, die Wahrscheinlichkeit der Erstellung von kompatiblen Handlungsplänen und Handlungsausführungen zu erhöhen. Der Austausch der beiden Partner bei der Situationserfassung ermöglicht die Ergänzung oder Korrektur des internen Abbildes der Umgebung bei fehlenden oder fehlerhaften Informationen. Beispielsweise kann der Fahrer durch die Automation auf ein Objekt im Verkehrsraum aufmerksam gemacht werden, das er übersehen hat. Aufgrund dieser Information könnte der Fahrer seinen ursprünglichen Handlungsplan anpassen. Für die gemeinsame Handlungsausführung ist es zum Beispiel hilfreich, wenn die Abweichung von einem Handlungsplan als Grundlage von Korrekturreaktionen von beiden Partnern ähnlich eingeschätzt wird.

3.2.5 Mentale Modelle

Die Automation muss es dem Fahrer ermöglichen, ein mentales Modell der Automation aufzubauen. Ein mentales Modell ist eine individuelle kognitive Repräsentation von zum Beispiel Objekten oder Systemen, mit denen der Fahrer interagiert (siehe zum Beispiel [154]). Es bietet dem Fahrer die Möglichkeit, das Systemverhalten zu verstehen und zu prädictieren. Das Verständnis des Fahrers für die Strategien und Handlungen der kooperativen Automation ist essentiell für das Vertrauen zur Automation, für die gemeinsame Entwicklung von Strategien und für die gemeinsame Ausführung von Handlungen. Eine gemeinsame Handlungsausführung wird erschwert, wenn die Automation für den Fahrer unerwartete Aktionen ausführt. Für die Kommunikation und die Änderung von Strategien ist es für den Fahrer wichtig zu verstehen, warum die Automation zu einer bestimmten Strategie gelangt. So kann in einer Kommunikation einfacher eine Änderung dieser Strategie bewirkt werden. Der Fahrer kann ebenfalls seine eigene Strategie ändern, da er den Grund für die Wahl der Automation erkannt hat („What is it doing? Why is it doing that? What is it going to do next?“ [207]).

Der Fahrer kann ein mentales Modell nur aufbauen auf der Basis von beobachtbaren Systemreaktionen aufgrund seiner Eingaben oder aufgrund von ebenfalls beobachtbaren Umwelteinflüssen (siehe zum Beispiel [155]). Passen diese Reaktionen zu denen, die der Fahrer bei manueller Aufgabenausführung selbst zeigen würde, kann er seine Art der Aufgabenbearbeitung als Grundlage für den Aufbau des mentalen Modells der Automation nutzen. Das bedeutet: Sind die Systemreaktionen kompatibel, ist der Aufbau des mentalen Modells für den Nutzer besonders einfach möglich. Daher ist die Kompatibilität der Automation eine zentrale Anforderung.

Die Gültigkeit eines vollständigen mentalen Modells der Automation, das sich der Fahrer aufgebaut hat, muss durch diese gewährleistet werden. Daher muss die Automation in gleichartigen Situationen ein gleichartiges Systemverhalten zeigen. Anderenfalls wird das aufgebaute mentale Modell zerstört. Für den Aufbau eines vollständigen mentalen Modells der Automation durch den Fahrer ist ein konsistentes Systemverhalten ebenfalls eine entscheidende Voraussetzung. Die Automation

sollte ebenfalls ein mentales Modell des individuellen Fahrers aufbauen können, um so das Verhalten des Fahrers verstehen und präzisieren zu können. Damit ist es für die Automation möglich, dem individuellen Verhalten des Fahrers angepasste Reaktionen zu zeigen (siehe zum Beispiel [114]).

3.2.6 Kommunikation

Eine für den Fahrer und für die Automation verständliche Kommunikation ist für die Realisierung einer kooperativen Beziehung bei der Aufgabenbearbeitung das entscheidende Instrument. Ein Beispiel dafür ist die gemeinsame Handlungsplanung (siehe Kapitel 3.2.2). In jeder Phase der Aufgabenbearbeitung sollen Kommunikationsmöglichkeiten vorgesehen werden, um für die Zusammenarbeit vielfältige Möglichkeiten zu schaffen. So kann die Zusammenarbeit in genau der Phase erfolgen, in der es für die aktuelle Aufgabenstellung am effizientesten erscheint. Bei einer hierarchisch strukturierten Aufgabenbearbeitung müssen in jeder Hierarchieebene Kommunikationsmöglichkeiten vorhanden sein. Durch eine kontinuierliche Kommunikation kann vermieden werden, dass der Fahrer den Regelkreis der Fahrzeugführung verlässt.

Um die Verständlichkeit der Kommunikation zu gewährleisten, muss eine gemeinsame Sprache gefunden werden (siehe auch [94]). Die Entwicklung der gemeinsamen Sprache wird durch die Berücksichtigung der äußeren Kompatibilität der Automation erst ermöglicht. Im Bereich der inneren Kompatibilität bilden kompatible Repräsentationen der Handlungen und anderer Kommunikationsinhalte die Grundlage. Bei nicht kompatiblen Repräsentationen muss eine Übersetzungsleistung erbracht werden.

Die gemeinsame Sprache sollte die Kommunikation zum Beispiel über geplante Handlungen auf verschiedenen Abstraktionsgraden ermöglichen. Damit kann der für die intendierte Botschaft effizienteste Abstraktionsgrad genutzt werden. So sind im Bereich der Fahrzeugführung eher abstrakte Kommunikationsformen, die sich Begriffen bedienen, und konkretere Kommunikationsformen, die eine genauere Beschreibung des räumlichen und zeitlichen Ablaufes einer Handlung nutzen, denkbar.

Im System aus Fahrer, Automation und Fahrzeug sowie Umwelt (siehe Abbildung 3.1) sind verschiedene Kommunikationswege möglich (siehe Abbildung 3.6). Zum einen kann die Kommunikation direkt zwischen Automation und Fahrer erfolgen. Dieses wird im Folgenden als explizite Kommunikation bezeichnet (siehe Abbildung 3.6). Hier ist die Absicht des sendenden Partners, mit einer Botschaft dem empfangenden Partner etwas mitzuteilen. Ein Beispiel für eine explizite Botschaft ist die durch einen Tastendruck gesendete Mitteilung des Fahrers an die Automation, dass diese bei der Handlungsausführung etwas verändern soll.

Da beide Partner aufgrund der gemeinsamen Handlungsausführung in die Fahrzeugführung involviert sind, kann Kommunikation zwischen den Partnern auch mittels einer Veränderung des Fahrzeugzustandes bezüglich der Umgebung erfolgen. Dieses wird im Folgenden als implizite Kommunikation bezeichnet (siehe Abbildung 3.6). Dabei ist es nicht die vordergründige Absicht der Partner, dem jeweils anderen Partner eine Botschaft zu senden, sondern es liegt die Absicht vor, das Fahrzeug zu steuern. Beispielsweise beeinflusst der Fahrer das aktuell vom Fahrzeug gefahrene Manöver. Die Automation kann diese Veränderung des aktuell vom Fahrzeug gefahrenen Manövers

als implizite Botschaft empfangen und darauf reagieren (zum Beispiel indem sie ihren Handlungsplan anpasst).

Die Möglichkeit des Empfangs von impliziten Botschaften durch die Automation sieht auch Nagel [144] als notwendig an: „Ein FAS [Fahrerassistenzsystem] vermag den Fahrer angemessener zu unterstützen, wenn es das vom Fahrer gerade durchgeführte Fahrmanöver kennt, ohne vom Fahrer jeweils darüber unterrichtet werden zu müssen“.

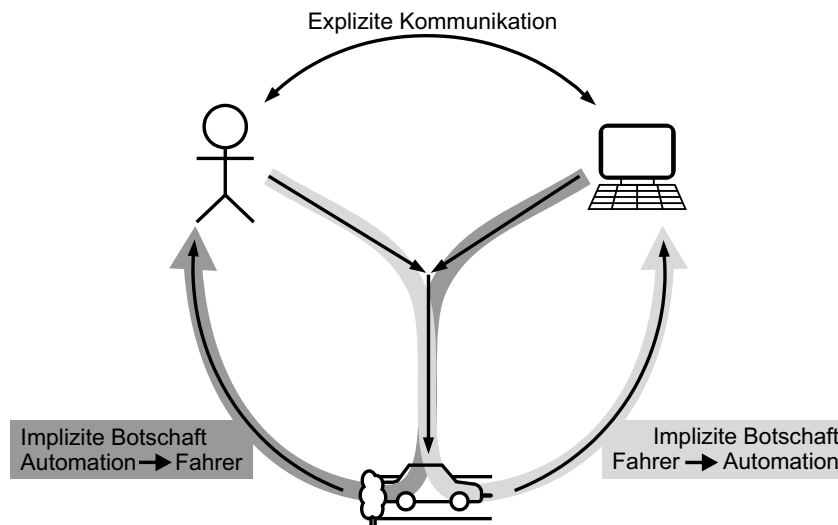


Abbildung 3.6: Implizite und explizite Kommunikation (Darstellung basiert auf Flemisch et al. [69])

3.2.7 Rolle und Entscheidungsspielraum

Um die Beziehung zwischen Fahrer und Automation dezidiert und konsistent gestalten zu können, ist die Definition von Rollen für die beiden Akteure hilfreich (siehe auch [90]). Mittels der Rollendefinition können Verantwortung und Autorität der beiden Partner ebenso wie eine hierarchische oder gleichrangige Beziehung festgelegt werden. Design Metaphern (zum Beispiel Kopiloten-Metapher oder H-Metapher) oder der Blick in soziale Beziehungen (zum Beispiel in der Arbeitswelt) bieten Leitlinien zur Definition der Rollen. Im Sinne der Kooperation müssen die definierten Rollen grundsätzlich die partnerschaftliche Zusammenarbeit ermöglichen. So sind zum Beispiel die streng hierarchischen Rollen eines Befehlsgebers und Befehlsempfängers nicht im Sinne des Konzeptes. Um keine falschen Erwartungen zu erzeugen, muss das Rollenverständnis des Fahrers mit der ihm bei der Systemgestaltung zugedachten Rolle hinreichend übereinstimmen.

Zur Umsetzung der Rolle dient die Modellierung eines Entscheidungsspielraumes in der Automation. Damit wird festgelegt, welche Entscheidungen die Automation direkt treffen darf und bei welchen Entscheidungen Rücksprache mit dem Fahrer gehalten werden muss. Dazu zählt zum Beispiel die Entscheidung bezüglich der Verschiebung der Kontrollanteile der Partner für die gemeinsame Handlungsausführung. Ebenso ist hier die Entscheidung hinsichtlich des Ausführungsbeginns einer neuen Handlung anzuführen. So kann die Automation die Ausführung einiger Handlungen direkt auf ihre alleinige Initiative beginnen, während sie bei anderen Handlungen dem Fahrer nur anzeigen kann, dass sie diese jetzt präferieren würde. Erst nach einer Bestätigung durch den Fahrer kann sie mit der Ausführung beginnen.

3.2.8 Zustandsüberwachung

Das Element der Zustandsüberwachung adressiert die Selbstüberwachung des Zustandes der Automation sowie die Überwachung des Fahrerzustandes. Diese Überwachungen bieten der Automation die Möglichkeit, auf reduzierte Leistungsfähigkeit eines Partners adäquat zu reagieren, um so die Sicherheit des Fahrers zu gewährleisten.

Mittels der Fahrerzustandsüberwachung ist die Automation zum Beispiel in der Lage, reduzierte Vigilanz des Fahrers festzustellen (siehe zum Beispiel [115]). Geeignete Reaktionen reichen von einer diesbezüglichen Information des Fahrers mittels expliziter Kommunikation bis hin zu einer Erhöhung des Kontrollanteiles der Automation auf 100 %, um das Fahrzeug in einen sicheren Zustand zu bringen.

Für die Überwachung ihres eigenen Zustandes muss die Automation fortwährend bestimmen, welche ihrer Fähigkeiten aktuell zur Verfügung stehen. Im Bereich der vollautomatischen Fahrzeuge wird ein derartiges Vorgehen zum Beispiel von Siedersberger [189] beschrieben. Gründe für reduzierte Automationsfähigkeiten können fehlende bauliche Voraussetzungen in der Umwelt oder Ausfälle von Sensoren sein. Verfügt die Automation über diese Informationen, kann sie dem Fahrer gezielt mitteilen, wie der derzeitige von der Automation gebotene Funktionsumfang für die gemeinsame Handlungsplanung und -ausführung eingeschränkt ist. Im Sinne der kooperativen Beziehung zwischen den beiden Partnern kann der Fahrer in diesem Fall einen deutlich größeren Kontrollanteil übernehmen und die sichere Fahrzeugführung ist weiterhin gewährleistet.

3.3 Abstrakte Bewertung des Potentials des Konzeptes

Nachdem das Konzept der kooperativen Automation zur teil- und hochautomatisierten Fahrzeugführung anhand der Kooperation ausmachenden Elemente ausgearbeitet wurde, erfolgt abschließend eine erste abstrakte Bewertung des Potentials dieses Konzeptes hinsichtlich der Ziele der vorliegenden Arbeit. Die einzelnen Kooperation ausmachenden Elemente werden dazu bezüglich ihres potentiellen Beitrages zur Vermeidung möglicher Probleme im Zusammenwirken von Fahrer und Automation bewertet. Die Vermeidung dieser Probleme bildet einen Teil des durch eine Automation bewirkten Sicherheitsgewinnes, da diese Probleme zu kritischen Situationen führen könnten. Um den gesamten potentiellen Sicherheitsgewinn zu beurteilen, wird auch der mögliche Beitrag der einzelnen Elemente zu weiteren, einen Sicherheitsgewinn hervorrufenden, Auswirkungen einer Automation bewertet. Die Beurteilung des Beitrages der Elemente zu verschiedenen, einen Komfortgewinn bewirkenden, Aspekten bildet den Abschluss. Die Ergebnisse der Bewertungen sind in Tabelle 3.1 dargestellt. Verfügt ein Kooperation ausmachendes Element über das Potential, zu einem der in der Tabelle aufgeführten Aspekte beizutragen, so wird dies durch die Markierung „+“ gekennzeichnet. Liegt ein besonders hoher erwarteter Beitrag vor, wird dies durch die Markierung „++“ kenntlich gemacht. Für die detaillierte Vorstellung der in Tabelle 3.1 aufgeführten möglichen Probleme im Zusammenwirken von Fahrer und Automation sei auf Kapitel 1.2 verwiesen.

Als Zusammenfassung der in Tabelle 3.1 gezeigten Ergebnisse lässt sich festhalten, dass durch die einzelnen Kooperation ausmachenden Elemente ein hoher Beitrag zur Vermeidung von Problemen im Zusammenwirken von Fahrer und Automation erwartet werden kann. Durch die Vermeidung dieser Probleme sowie durch die weiteren aufgeführten Auswirkungen kann ein hohes Potential zur Bewirkung eines Sicherheitsgewinnes festgestellt werden. Des Weiteren lässt sich ein hohes Potential zur Bewirkung eines Komfortgewinnes ausmachen. Besonders hervorzuheben ist der erwartete Beitrag der gemeinsamen Handlungsplanung und Handlungsausführung, der hinsichtlich des Großteils der aufgeführten Aspekte als sehr positiv bewertet werden kann.

Bei der hier erfolgten abstrakten Bewertung des Konzeptes wurden keine potentiellen negativen Effekte festgestellt. Erfolgt allerdings eine nachteilige Ausgestaltung des Konzeptes, können bei einer Umsetzung sowohl negative Effekte auftreten als auch die beschriebenen potentiellen positiven Effekte ausbleiben. Dies begründet sich dadurch, dass der Fahrer hauptsächlich die konkrete Ausgestaltung des Konzeptes in einer Umsetzung wahrnimmt und damit diese einen sehr starken Einfluss auf die erzielten Effekte hat.

	Kooperation ausmachende Elemente								
	Kompatibilität	Gem. Weiterentw. der Ziele u. Werte	Gem. Aufbau des Situationsbewusstseins	Gemeinsame Handlungsplanung	Gemeinsame Handlungsausführung	Mentale Modelle	Kommunikation	Rolle und Entscheidungsspielraum	Zustandsüberwachung
Sicherheitsgewinn durch Vermeidung möglicher Probleme im Zusammenwirken von Fahrer und Automation									
Vermeidung von übersteigertem Vertrauen zur Automation						+	+	+	
Vermeid. der „Out-of-the-loop“ Problematik		+	+	++	++		+		+
Vermeidung von nicht erwartungsgemäßem Verhalten der Automation	++	+	+			++	+	+	
Vermeid. des Verlustes manueller Fähigkeiten			+	++	++				
Vermeidung von durch geringe Belastung begründeter Unaufmerksamkeit		+	+	++	++		+		
Vermeidung von durch mentalen Abstand zur Aufgabe begründetem verminderten Situationsbewusstsein			+	++	++		+		
Sicherheitsgewinn durch weitere Wirkungen der Automation									
Redundanz / Eingehen auf verminderte Fähigkeiten des Partners	+		+	++	++				++
Entlastung des Fahrers bei der Erfüllung der Fahraufgabe			+	++	++				
Vermeidung von durch Unaufmerksamkeit des Fahrers verursachten kritischen Fahrsituationen			+	++	++				+
Komfortgewinn durch die Automation									
Entlastung des Fahrers bei der Erfüllung der Fahraufgabe			+	++	++				
Wohlgefühl des Fahrers hinsichtlich der Handlungen der Automation	++	+				+	+	+	
Adaptierbarkeit des Automationsverhaltens an die Bedürfnisse des Fahrers	+	+		++	++	+	+		
Adaptierbarkeit des Automationseinflusses an die Bedürfnisse des Fahrers				+	++	+	+	+	
Freude des Fahrers an der partnerschaftlichen Zusammenarbeit mit der Automation	+	+	+	++	++	+	+		

Tabelle 3.1: Abstrakte Bewertung des potentiellen Beitrages der Kooperation ausmachenden Elemente zum durch die Automation bewirkten Gewinn (+: potentieller Beitrag, ++: besonders hoher potentieller Beitrag)

3.4 Zusammenfassung des Kapitels

In diesem Kapitel wurde das Konzept der kooperativen Automation zur teil- und hochautomatisierten Fahrzeugführung allgemein vorgestellt. Basierend auf einer grundlegenden Definition von kooperativer Automation zur teil- und hochautomatisierten Fahrzeugführung wurde das Konzept anhand der strukturierten Betrachtung Kooperation ausmachender Elemente detailliert ausgearbeitet. Bei der abschließenden abstrakten Bewertung wurde das Potential des Konzeptes bezüglich der Minimierung von Problemen im Zusammenwirken von Fahrer und Automation und des Gewinnes von Komfort und Sicherheit theoretisch dargelegt. Die wesentliche Neuheit des vorgestellten Konzeptes der kooperativen Automation ist die strukturierte und detaillierte Ausarbeitung der Kooperationsidee für das teil- und hochautomatisierte Fahren. Da das vorgestellte Konzept gezielt für das teil- und hochautomatisierte Fahren, aber unabhängig von einer konkreten Umsetzung ausgearbeitet wurde, lässt sich dieses unabhängig von der vorliegenden Arbeit für die Entwicklung verschiedenster Automationssysteme verwenden.

Hinsichtlich der Zielsetzung der vorliegenden Arbeit bildet dieses Kapitel die Grundlage der weiteren Ausführungen. Die erste zentrale Fragestellung dieser Arbeit „Wie kann ein Konzept für eine kooperative Automation für das teil- und hochautomatisierte Fahren technisch konkret aussehen, welches das Potential aufweist, die Probleme im Zusammenwirken von Mensch und Automation zu minimieren sowie einen Komfort- und Sicherheitsgewinn zu erreichen?“ kann durch das Kapitel teilweise beantwortet werden. Da die Überlegungen allgemein gehalten sind, fehlt zur vollständigen Beantwortung dieser Fragestellung einerseits die technische Konkretisierung des Konzeptes. Das folgende Kapitel 4 adressiert diese technische Konkretisierung, die für eine Umsetzung des Konzeptes erfolgen muss. Andererseits fehlt zur vollständigen Beantwortung die Evaluierung hinsichtlich der erhofften Wirkungen. Im Rahmen des iterativen Entwicklungsprozesses wurden diverse Evaluierungen durchgeführt. Kapitel 8 stellt diese dar.

Im Übrigen bilden die in diesem Kapitel ausgearbeiteten Kooperation ausmachenden Elemente ein strukturierendes Element für die weiteren Ausführungen dieser Arbeit. Zur Übersicht gibt Tabelle C.1 in Anhang C daher einen Überblick der in den einzelnen Abschnitten der Arbeit adressierten Kooperation ausmachenden Elemente.

Die folgende Tabelle 3.2 gibt abschließend eine Kurzzusammenfassung des vorliegenden Kapitels 3.

Inhalt des Kapitels
<ul style="list-style-type: none"> • Allgemeine Vorstellung des Konzeptes der kooperativen Automation zur teil- und hochautomatisierten Fahrzeugführung • Grundlegende Definition von kooperativer Automation zur teil- und hochautomatisierten Fahrzeugführung • Detaillierte Ausarbeitung von kooperativer Automation anhand strukturierter Betrachtung Kooperation ausmachender Elemente • Abstrakte Bewertung des Potentials bezüglich der Minimierung von Problemen im Zusammenwirken von Fahrer und Automation und des Gewinnes von Komfort und Sicherheit
Beitrag zum Stand der Technik
<ul style="list-style-type: none"> • Strukturierte und detaillierte Ausarbeitung der Kooperationsidee für das teil- und hochautomatisierte Fahren
Stand bezüglich der Fragestellungen der Arbeit
<p>Fragestellung 1: „Wie kann ein Konzept für eine kooperative Automation für das teil- und hochautomatisierte Fahren technisch konkret aussehen, welches das Potential aufweist, die Probleme im Zusammenwirken von Mensch und Automation zu minimieren sowie einen Komfort- und Sicherheitsgewinn zu erreichen?“</p> <p>Erreichter Stand hinsichtlich der Beantwortung der Fragestellung 1:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Vorgestelltes allgemeines Konzept der kooperativen Automation bildet die Grundlage zur Beantwortung der Fragestellung • Abstrakte Bewertung bietet erste Hinweise hinsichtlich der möglichen Wirkpotentiale der kooperativen Automation <p>Offen zur vollständigen Beantwortung der Fragestellung 1:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Technische Konkretisierung des Konzeptes → Kapitel 4 • Evaluierung hinsichtlich der avisierten Wirkpotentiale → Kapitel 8

Tabelle 3.2: Kurzzusammenfassung von Kapitel 3

4 Technische Konkretisierung der kooperativen Automation

Die technische Konkretisierung des Konzeptes der kooperativen Automation bildet die Verbindung von den abstrakten Überlegungen des vorigen Kapitels zu einer Umsetzung der kooperativen Automation. Das Ziel dieser Konkretisierung ist es somit, die Grundlage für eine technische Umsetzung der kooperativen Automation zu schaffen und damit tiefergehende technische Überlegungen bezüglich der Umsetzung zu ermöglichen. Das vorliegende Kapitel fokussiert auf die technische Konkretisierung der Kooperation ausmachenden Elemente Kompatibilität, gemeinsame Handlungsplanung, gemeinsame Handlungsausführung und Kommunikation.

Im Weiteren erfolgt zunächst die Konkretisierung der gemeinsamen Handlungsplanung mittels des Valentalkonzeptes (Kapitel 4.1). Im Anschluss wird eine funktionale Systemarchitektur für die kooperative Automation vorgestellt (Kapitel 4.2), die insbesondere auf die Konkretisierung von Kompatibilität, gemeinsamer Handlungsplanung, gemeinsamer Handlungsausführung und Kommunikation abzielt. Einen Kernpunkt der funktionalen Systemarchitektur bildet die Betrachtung der Fahrzeugführungsaufgabe in einzelnen Ebenen. Für die einzelnen Ebenen werden in Kapitel 4.3 verschiedene Repräsentationen des Automationsverhaltens für die gemeinsame Handlungsplanung und Handlungsausführung mit dem Fahrer vorgestellt. Abschließend erfolgt in Kapitel 4.4 die Konkretisierung der Kompatibilität hinsichtlich der Entwicklung kompatibler Ziele, Werte und Methoden für die kooperative Automation. Tabelle 4.1 zeigt eine Übersicht der durch die einzelnen Abschnitte dieses Kapitels adressierten Kooperation ausmachenden Elemente (siehe dazu auch Tabelle C.1).

4.1 Das Valentalkonzept für die gemeinsame Handlungsplanung

Wie in Kapitel 3.2.2 beschrieben wurde, muss die Automation zur Ermöglichung der gemeinsamen Handlungsplanung einerseits über das Wissen verfügen, welche Handlungen durch sie durchführbar sind und andererseits diese Handlungen bewerten, um ihre Präferenzen deutlich machen zu können. Da die Durchführbarkeit einer Handlung von der betrachteten Situation abhängt, muss die Automation dazu zunächst die Menge oder den Raum der durch sie durchführbaren Handlungen neu bestimmen. Bei dieser Bestimmung ist nicht zu berücksichtigen, ob es aus Sicht der Automation sinnvoll ist, eine Handlung in der betrachteten Situation durchzuführen, sondern nur, ob die Durchführung möglich ist. Auf der Basis dieser Menge an Handlungsoptionen kann mittels der Ziele und Werte der Automation die Bewertung erfolgen, um die Automationspräferenzen festzulegen. Die Bewertungen der Handlungsoptionen bilden dann die Grundlage für die Gestaltung einer Verhandlung zwischen Fahrer und Automation, um einen Kompromiss herbeizuführen und somit den gemeinsamen Handlungsplan festzulegen. Es stellt sich die Frage, wie die der Verhand-

	Kooperation ausmachende Elemente								
	Kompatibilität	Gem. Weiterentwicklung der Ziele u. Werte	Gem. Aufbau des Situationsbewusstseins	Gemeinsame Handlungsplanung	Gemeinsame Handlungsausführung	Mentale Modelle	Kommunikation	Rolle und Entscheidungsspielraum	Zustandsüberwachung
Valentialkonzept für die gemeinsame Handlungsplanung (Kapitel 4.1)	×			×			×		
Funktionale Systemarchitektur für die kooperative Automation (Kapitel 4.2)	×		×	×	×		×		
Repräsentationen des Automationsverhaltens für die Kooperation mit dem Fahrer (Kapitel 4.3)				×	×		×		
Entwicklung kompatibler Ziele, Werte und Methoden für die kooperative Automation (Kapitel 4.4)	×								

Tabelle 4.1: Durch die technische Konkretisierung adressierte Kooperation ausmachende Elemente

lung zugrunde liegenden Bewertungen der Handlungsoptionen gebildet werden können. Dazu wird in dieser Arbeit das in diesem Abschnitt vorgestellte Valentialkonzept vorgeschlagen. Im Rahmen dieses Konzeptes werden die Handlungsoptionen mit dem Valential bewertet.

Im Folgenden wird zunächst das aus der Psychologie bekannte Erwartung-mal-Wert-Prinzip vorgestellt. Dieses Prinzip ist mit dem Valentialkonzept verwandt und kann ebenfalls zur kompatiblen Bewertung der Handlungsoptionen in einer Automation eingesetzt werden. Im Anschluss daran folgt die detaillierte Vorstellung des Valentialkonzeptes. Abschließend werden die beiden Konzepte anhand der dargelegten Definitionen verglichen und die Unterschiede herausgearbeitet.

Erwartung-mal-Wert-Prinzip

Das Erwartung-mal-Wert-Prinzip ist eine in der Psychologie entwickelte einfache Modellvorstellung von menschlichen Handlungsentscheidungen bzw. von menschlichen Handlungsbewertungen. Auf dieser Basis wurden verschiedene Modelle entwickelt (siehe zum Beispiel [103, 107]). Das einfache Erwartung-mal-Wert-Modell bietet mittels einer grundlegenden Modellierung eine erste Näherung von menschlichen Handlungsbewertungen. Für dieses Modell wird der Nutzen einer Hand-

lung auf der Basis der Eintrittswahrscheinlichkeit und des Wertes von eintretenden Konsequenzen bestimmt. Die Eintrittswahrscheinlichkeit (Erwartung) wird für jede Konsequenz mit deren Wert multipliziert. Die Summe über alle Konsequenzen bildet den Nutzen (Gleichung 4.1, für n betrachtete Konsequenzen):

$$\text{Nutzen} = \sum_{i=1}^n \text{Erwartung}_i \cdot \text{Wert}_i \quad (4.1)$$

Schreiner [182] nutzt dieses Modell in einer Automation für vollautomatisches Fahren zum Treffen von Handlungsentscheidungen. Er wählt das einfache Erwartung-mal-Wert-Modell, da das Ziel der Automation die Nachbildung des individuellen Fahrstils eines menschlichen Fahrers ist (für eine detailliertere Beschreibung siehe Kapitel 2.2.2). Daher ergibt sich in seiner Arbeit die Notwendigkeit der Realisierung eines Entscheidungsverhaltens, das dem eines Fahrers möglichst nahe kommt. Da das einfache Erwartung-mal-Wert-Modell eine anerkannte Modellierung des menschlichen Entscheidungsverhaltens bietet, ist die Kompatibilitätsforderung an das Entscheidungsverhalten der Automation bei Nutzung dieses Modells erfüllt. Damit kann es zur kompatiblen Bewertung von Handlungsoptionen für eine Automation genutzt werden.

Valentialkonzept

Das in der vorliegenden Arbeit vorgeschlagene Valential beschreibt die relative Wertigkeit einer durchführbaren (möglichen) Handlung. Diese relative Bewertung ist auf die Verwendung als Grundlage der auf einer Verhandlung basierenden Kompromissfindung von Fahrer und Automation ausgerichtet. Der Begriff Valential ist eine Kombination aus den Begriffen Valenz und Potential. Valenz bedeutet im Allgemeinen Wertigkeit [2]. Potential wird allgemein als Möglichkeit definiert [3]. Der Begriff Valenz wurde bereits 1938 von Gibson und Crooks [79] zur Beschreibung der Bewertung von Fahrsituationen verwandt. Objekte, zu denen sich das Eigenfahrzeug hinbewegen soll (zum Beispiel die Fahrstreifenmitte), beschreiben sie mit positiven Valenzen. Negative Valenzen beziehen sie auf Objekte, von denen sich das Eigenfahrzeug wegbewegen soll (zum Beispiel andere Fahrzeuge).

Erste Überlegungen zum Valentialkonzept wurden vom Autor dieser Arbeit bereits kurz in [128] und [129] vorgestellt. Der vorliegende Abschnitt basiert auf diesen Überlegungen.

Das Valential v ($v \in [0, 1]$) berechnet sich auf der Grundlage der Durchführbarkeit einer Handlung und dem relativen Wert dieser Handlung bezüglich den Zielen der Automation (Gleichung 4.2):

$$v = \min(d + r, 1) \cdot w_{rel} \quad (4.2)$$

Die Durchführbarkeit d ($d \in [0, 1]$) einer Handlung beschreibt, inwieweit die Eigenschaften der betrachteten Situation unter Berücksichtigung der Automationseigenschaften die Durchführung dieser Handlung für die Automation ermöglichen. Eine hohe Durchführbarkeit bedeutet gleichermaßen, dass mit der Ausführung der Handlung eine geringe Gefährdung verbunden ist. Diese Überlegungen gelten subjektiv für die berücksichtigten Situationselemente und unter Einbeziehung des Wertesystems der Automation. Eine Handlung ist für die Automation durchführbar, wenn die Durchführbarkeit d hinreichend groß ist. Die Berechnung des Valentiales erfolgt nur für Handlungen, die

durchführbar sind ($d \geq d_{min}$). Der relative Wert w_{rel} ($w_{rel} \in [0, 1]$) einer durchführbaren Handlung beschreibt, wie gut die betrachtete Handlung im Vergleich zu den übrigen durchführbaren Handlungen die Ziele der Automation erfüllt. Zur Modellierung der Risikobereitschaft der Automation geht der Parameter r ($r \in [0, 1]$) ein. Je höher die Risikobereitschaft gewählt wird, desto geringer ist der Einfluss der Durchführbarkeit auf das Valential. Der Grund dafür liegt in der Begrenzung des Terms $d + r$ auf 1 mittels der Minimumfunktion, wodurch der Term $\min(d + r, 1)$ bei hohen Risikobereitschaften bereits bei geringeren Durchführbarkeiten seinen Maximalwert 1 aufweist. Dies hat zur Folge, dass eine weniger durchführbare Handlung mit einem hohen relativen Wert einer Handlung mit einer höheren Durchführbarkeit, aber einem niedrigeren relativen Wert, vorgezogen werden kann. Die Risikobereitschaft r steuert somit die Gewichtung des Einflusses von Durchführbarkeit d und relativem Wert w_{rel} auf das Valential v . Eine hohe Risikobereitschaft bewirkt eine hohe Gewichtung des Einflusses des relativen Wertes auf das Valential.

Zur Verdeutlichung zeigt die Abbildung 4.1 dreidimensionale Visualisierungen des Valentiales in Abhängigkeit der Durchführbarkeit und des relativen Wertes mit den Risikobereitschaften $r = 0, 25$ und $r = 0, 5$. In Abbildung 4.2 werden Schnitte durch die Valentialfunktion für verschiedene relative Werte und Durchführbarkeiten ebenfalls mit den Risikobereitschaften $r = 0, 25$ und $r = 0, 5$ dargestellt. Im Folgenden wird die Valentialfunktion anhand der Abbildungen analysiert.

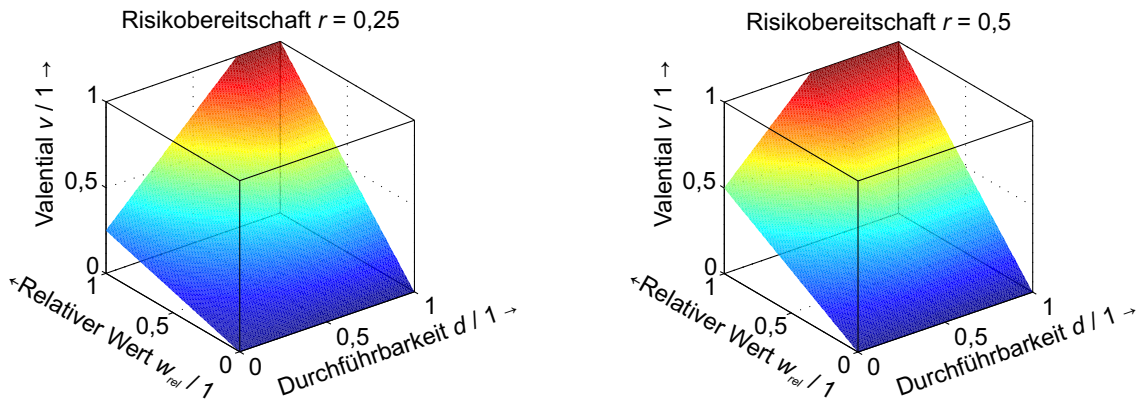


Abbildung 4.1: Dreidimensionale Visualisierung des Valentiales in Abhängigkeit der Durchführbarkeit und des relativen Wertes mit unterschiedlicher Risikobereitschaft (Links: $r = 0, 25$, Rechts: $r = 0, 5$)

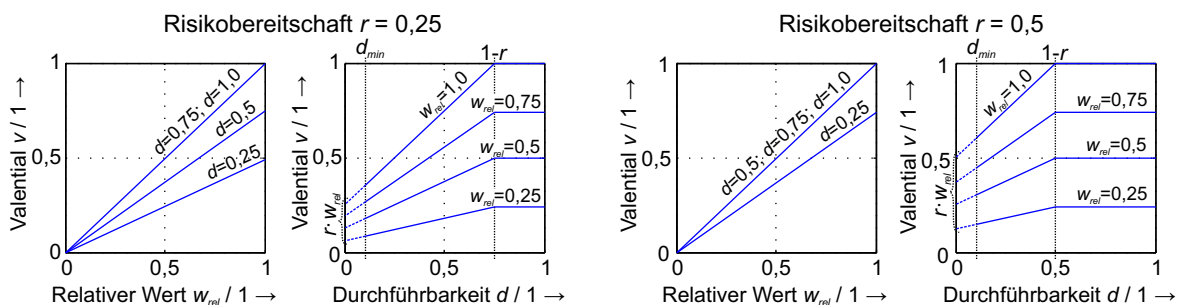


Abbildung 4.2: Schnitte durch die Valentialfunktion für verschiedene relative Werte und Durchführbarkeiten mit unterschiedlicher Risikobereitschaft (Links: $r = 0, 25$, Rechts: $r = 0, 5$)

Unabhängig von der Risikobereitschaft geht der relative Wert linear in das Valential ein. Die Steigung wird durch d bestimmt, solange $d < 1 - r$ ist. Bei $d \geq 1 - r$ ist sie 1. Das Valential ist somit über den gesamten Wertebereich sensitiv auf w_{rel} .

Die Berechnung des Valentiales erfolgt nur für Handlungen, deren Durchführbarkeit $d \geq d_{min}$, daher wird die Valentalfunktion im Bereich $d < d_{min}$ nicht ausgewertet. Aufgrund der Modellierung der Risikobereitschaft ist die Abhängigkeit des Valentiales von der Durchführbarkeit insgesamt nichtlinear. Außerdem erfolgt durch die Risikobereitschaft eine Parallelverschiebung in positiver Richtung des Valentiales. Im Wertebereich $d_{min} \leq d \leq 1 - r$ geht die Durchführbarkeit linear in das Valential ein. Im Wertebereich $d > 1 - r$ wird die Minimumfunktion wirksam und sorgt für den parallelen Verlauf des Valentiales zur Abszissenachse. Das heißt, bei $d > 1 - r$ ist alleine der relative Wert ausschlaggebend für das resultierende Valential. Je größer die Risikobereitschaft r ist, desto früher erfolgt die Abflachung des Verlaufes und desto früher ist alleine der relative Wert ausschlaggebend.

Generell bewirkt r eine Einstellbarkeit des benötigten Verhältnisses der w_{rel} zweier durchführbarer Handlungen mit verschiedenen Durchführbarkeiten, so dass eine Handlung der anderen vorgezogen wird: Handlung 1 ($w_{rel,1}, d_1$) und Handlung 2 ($w_{rel,2}, d_2$) verfügen über die Durchführbarkeiten $d_1 < d_2$. Damit Handlung 1 im Ergebnis das höhere Valential bekommt und damit vorgezogen wird, muss gelten $\frac{w_{rel,1}}{w_{rel,2}} > \frac{\min(d_2+r,1)}{\min(d_1+r,1)}$. Somit folgt, je größer r ist, desto kleiner ist das benötigte Verhältnis $\frac{w_{rel,1}}{w_{rel,2}}$, damit Handlung 1 präferiert wird. Das heißt, es genügt ein kleinerer Vorteil bezüglich des relativen Wertes, um eine Handlung bei geringerer Durchführbarkeit zu präferieren. Oder anders gesagt, ein größerer Nachteil hinsichtlich der Durchführbarkeit wird in Kauf genommen, um einen Vorteil bezüglich des relativen Wertes bei der Handlungsauswahl zu erreichen. Es wird somit ein höheres Risiko eingegangen, um eine Handlung mit einem höheren relativen Wert zu bevorzugen. In Tabelle 4.2 wird die beschriebene Valentalfunktion anhand eines Zahlenbeispiels mit drei Handlungen und drei verschiedenen Risikobereitschaften abschließend weiter verdeutlicht.

	d	w_{rel}	v bei $r = 0,1$	v bei $r = 0,25$	v bei $r = 0,5$
Handlung 1	1	0,9	0,9	0,9	0,9
Handlung 2	0,6	1	0,7	0,85	1
Handlung 3	0,2	0,6	0,18	0,27	0,42

Tabelle 4.2: Zahlenbeispiel zur Valentialberechnung für drei durchführbare Handlungen und drei verschiedene Risikobereitschaften (das Valential der präferierten Handlung ist jeweils durch eine fette Schriftstärke markiert)

Vergleich der beiden Konzepte

Bei der Betrachtung der Gleichungen zur Definition des Nutzens und des Valentiales (Gleichungen 4.1 und 4.2) werden die Verwandtschaft der Konzepte sowie die Unterschiede deutlich. Beim Nutzen wird durch die Erwartung die Eintrittswahrscheinlichkeit der Konsequenzen beschrieben. Im Gegensatz dazu kann die Durchführbarkeit als Bestandteil des Valentiales als Eintrittswahrscheinlichkeit der Handlung (Erwartung ob die Handlung gelingt) gesehen werden. Die Werte der Konsequenzen in der Nutzenberechnung sind statisch, dagegen ist der relative Wert bei der Valen-

tialberechnung abhängig von den in der betrachteten Situation durchführbaren Handlungen. Damit wird durch das Valentalkonzept eine relative Bewertung der vorhandenen Handlungsoptionen geboten, im Gegensatz zum Nutzen, der eine absolute Bewertung der jeweiligen Handlungsoptionen darstellt.

Die Verwandtschaft der Konzepte zeigt sich des Weiteren durch die multiplikative Beziehung der jeweiligen eingehenden Größen, die, wie dargelegt wurde, in Bezug zueinander stehen. Aufgrund dieser in beiden Konzepten vorhandenen multiplikativen Beziehung und der Kompatibilität des einfachen Erwartung-mal-Wert-Modells kann für das Valentalkonzept ebenfalls eine Kompatibilität zum Fahrer abgeleitet werden.

In diesem Abschnitt wurde das Valentalkonzept unabhängig von der Fahraufgabe und somit unabhängig vom teil- und hochautomatisierten Fahren vorgestellt. Bei der im folgenden Abschnitt (Kapitel 4.2) entworfenen funktionalen Systemarchitektur für die kooperative Automation erfolgt mittels des Valentalkonzeptes die weitere Konkretisierung der gemeinsamen Handlungsplanung gezielt für das teil- und hochautomatisierte Fahren auf verschiedenen Ebenen der Fahraufgabe. Um als Grundlage der Verhandlung auf den Ebenen der Fahraufgabe mit dem Fahrer genutzt zu werden, müssen die mit Valentien bewerteten Handlungsoptionen in expliziten Repräsentationen abgelegt werden. In Kapitel 4.3 werden diese Repräsentationen vorgestellt.

4.2 Entwurf einer funktionalen Systemarchitektur für die kooperative Automation

Die funktionale Systemarchitektur für die kooperative Automation zielt insbesondere auf die technische Konkretisierung von Kompatibilität, gemeinsamem Aufbau des Situationsbewusstseins, gemeinsamer Handlungsplanung, gemeinsamer Handlungsausführung und Kommunikation ab. Eine zentrale Grundlage für den gemeinsamen Aufbau des Situationsbewusstseins, die gemeinsame Handlungsplanung und die gemeinsame Handlungsausführung wird durch die kognitive Kompatibilität der Automation gebildet (siehe auch Kapitel 3.2.2). Um kognitive Kompatibilität zwischen Fahrer und Automation zu erreichen, wird ein Modell der manuellen Fahrzeugführungsaufgabe erstellt und dieses Modell leicht modifiziert zur Strukturierung der Automation genutzt. Die Strukturierung der Fahrzeugführungsaufgabe in einzelne Ebenen bildet dabei einen Kernpunkt. Kapitel 4.2.1 stellt das erstellte Modell der manuellen Fahrzeugführungsaufgabe vor. Darauf aufbauend beschreibt Kapitel 4.2.2 die funktionale Systemarchitektur für die kooperative Automation.

Erste Überlegungen zu einer funktionalen Systemarchitektur für die kooperative Automation wurden vom Autor dieser Arbeit bereits kurz in [128] und [129] vorgestellt. Der vorliegende Abschnitt basiert auf diesen Überlegungen.

4.2.1 Modell der manuellen Fahrzeugführungsaufgabe

Um ein Modell der manuellen Fahrzeugführungsaufgabe zu erstellen, werden Aspekte verschiedener bekannter Modelle des menschlichen Verhaltens bei zielorientierten Tätigkeiten und Modelle

zur Beschreibung der vom Fahrer zu bearbeitenden Teilaufgaben bei der Fahrzeugführung zu einem Modell zusammengeführt und um einige Aspekte erweitert. Die betrachteten Modelle werden zunächst kurz vorgestellt (Kapitel 4.2.1.1). Im Anschluss daran erfolgt die Darstellung des im Rahmen der vorliegenden Arbeit erstellten kombinierten Vier-Stufen- und Vier-Ebenen-Modells der manuellen Fahrzeugführungsaufgabe (Kapitel 4.2.1.2).

4.2.1.1 Bekannte Modelle

Ein allgemeines Modell des menschlichen Verhaltens bei der Ausführung von zielgerichteten sensumotorischen Tätigkeiten in einem Mensch-Maschine-System beschreibt Rasmussen [167]. Das Führen eines Fahrzeuges gehört zu den zielgerichteten sensumotorischen Tätigkeiten. Rasmussen hierarchisiert das Verhalten in die drei Ebenen „wissensbasiertes Verhalten“, „regelbasiertes Verhalten“ und „fertigkeitsbasiertes Verhalten“ (siehe Abbildung 4.3). Die Ebene des fertigkeitsbasierten Verhaltens beschreibt stark automatisiert ablaufende Reiz-Reaktions-Mechanismen, die in einem Lernprozess eintrainiert wurden. Auf der Ebene des regelbasierten Verhaltens erfolgt die Bearbeitung von bekannten Situationen, für die gespeicherte Verhaltensmuster vorliegen. Auf der Basis von Regeln wird die erfahrungsgemäß effektivste Variante ausgesucht, was ebenfalls einen Lernprozess erfordert. In unbekannten Situationen, für die keine Regeln und Verhaltensmuster vorhanden sind, muss die Bearbeitung auf der Ebene des wissensbasierten Verhaltens erfolgen. Eine optimale Strategie wird hier auf Basis von Zielen und umfangreichem Hintergrundwissen (zum Beispiel mentales Modell des Systems) entwickelt.

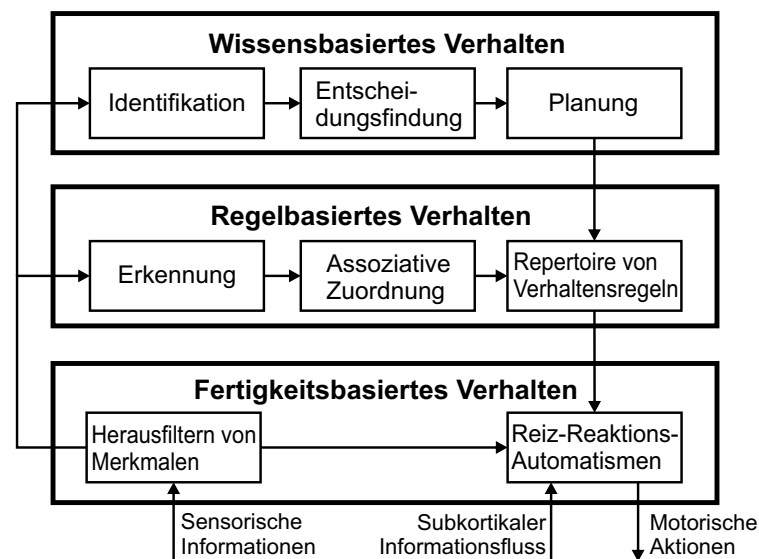


Abbildung 4.3: Modell des menschlichen Verhaltens bei Ausführung von zielgerichteten sensumotorischen Tätigkeiten nach Rasmussen [167]

Parasuram et al. [162] beschreiben ein einfaches Modell der menschlichen Informationsverarbeitung, das aus den vier Stufen Informationsaufnahme, Informationswahrnehmung bzw. Informationsintegration, Handlungsentscheidung und Handlungsausführung besteht. Endsley [57] befasst sich detailliert mit dem Aufbau des Situationsbewusstseins. In Endsleys Modell werden auf dieser Basis die Entscheidungen über die auszuführenden Handlungen und die Umsetzung dieser Hand-

lungen durchgeführt. Der Aufbau des Situationsbewusstseins umfasst die Wahrnehmung der Elemente, die Zusammenfassung der aktuellen Situation sowie eine modellbasierte Prädiktion des aktuellen Zustands.

Zur Beschreibung der zu bearbeitenden Teilaufgaben bei der Führung eines technischen Prozesses haben sich hierarchische Drei-Ebenen-Modelle etabliert (zum Beispiel [105]). Verschiedene Autoren beschreiben speziell die Fahrzeugführungsaufgabe mittels solcher Modelle [6, 47, 135]. Donges bezeichnet die drei Ebenen als Navigationsebene, Bahnführungsebene und Stabilisierungsebene (siehe Abbildung 4.4). Die Navigationsebene adressiert die Auswahl einer geeigneten Fahrtroute aus dem zur Verfügung stehenden Straßennetz, um eine Transportaufgabe zu erfüllen. Auf der Bahnführungsebene plant der Fahrer auf Grundlage der gewählten Fahrtroute sowie des aktuellen Straßenverlaufes und weiterer Objekte im Verkehrsraum die für den Fahrtablauf nötigen Führungsgrößen. Diese bestehen aus der Sollspur und der Sollgeschwindigkeit. Auf der Stabilisierungsebene bewältigt der Fahrer die Teilaufgabe, das Fahrzeug den in der Bahnführungsebene spezifizierten Führungsgrößen folgen zu lassen. Donges und Naab [48] setzen die Ebenen der Fahrzeugführungsaufgabe in Beziehung zum Modell des menschlichen Verhaltens bei zielorientierten Tätigkeiten von Rasmussen [167]. Die Navigationsebene wird der wissensbasierten Ebene zugeordnet. Für die Zuordnung der Teilaufgaben der Bahnführungsebene ist die Erfahrung des Fahrers entscheidend. Ein unerfahrener Fahrer bedient sich des wissensbasierten Verhaltens. Je erfahrener der Fahrer wird, desto mehr wird diese Teilaufgabe auf der Basis des regelbasierten und des fertigkeitbasierten Verhaltens ausgeführt. Die Stabilisierungsaufgabe wird vollständig dem fertigkeitbasierten Verhalten zugeordnet.

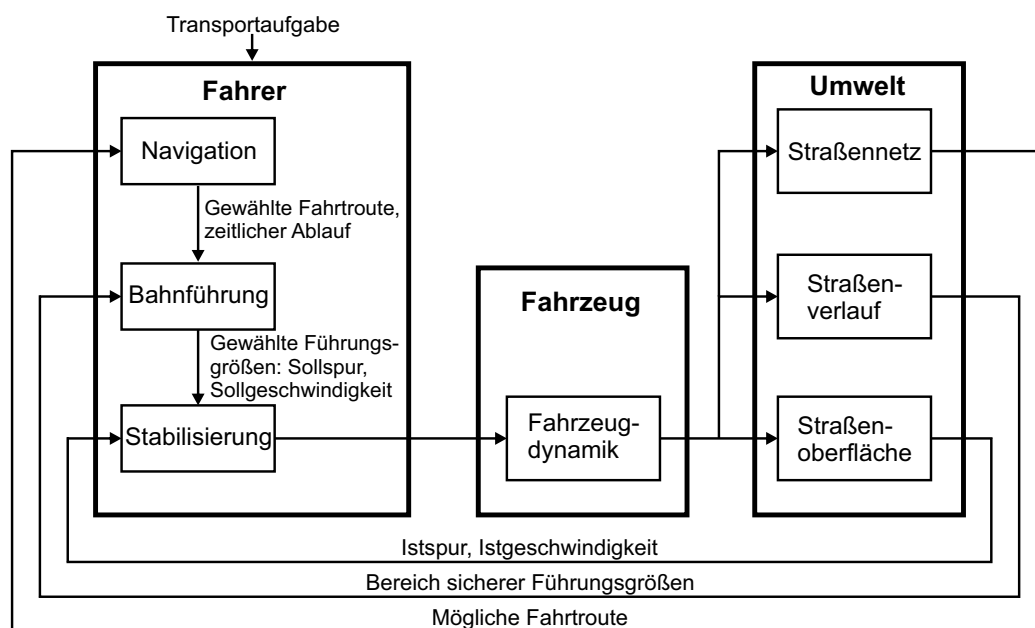


Abbildung 4.4: Drei-Ebenen-Modell der Fahrzeugführungsaufgabe nach Donges [47, S. 184]

4.2.1.2 Kombiniertes Vier-Stufen- und Vier-Ebenen-Modell der manuellen Fahrzeugführungsaufgabe

Im Folgenden wird das im Rahmen der vorliegenden Arbeit erstellte kombinierte Vier-Stufen- und Vier-Ebenen-Modell der manuellen Fahrzeugführungsaufgabe vorgestellt, das auf verschiedenen Aspekten der im vorherigen Abschnitt vorgestellten Arbeiten basiert. Durch dieses Modell werden die vom Fahrer bei der Fahrzeugführung zu bearbeitenden Teilaufgaben modelliert. Die Bearbeitung der Fahrzeugführungsaufgabe wird dazu in verschiedene Bearbeitungsstufen und -ebenen untergliedert. Dieser Ansatz wurde gewählt, um durch die Überlegung, in welche Teilaufgaben der Fahrer die Fahraufgabe untergliedert, eine gemeinsame Aufgabenbearbeitung (auch von einzelnen Teilaufgaben) im Sinne der kooperativen Automation zu ermöglichen. Da bei Rasmussen nicht die Strukturierung der zu bearbeitenden Aufgabe im Vordergrund steht, sondern wie der Mensch die betrachtete Tätigkeit ausführt, wurde dieser Ansatz nicht als Grundlage gewählt. Abbildung 4.5 zeigt das entwickelte Modell gemeinsam mit dem vom Fahrer geführten Fahrzeug in der Umwelt.

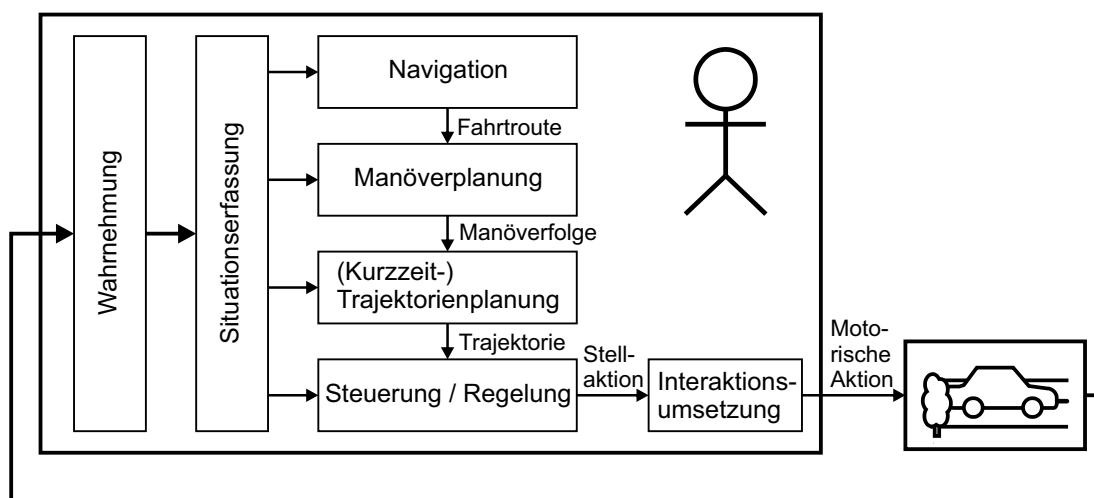


Abbildung 4.5: Kombiniertes Vier-Stufen- und Vier-Ebenen-Modell der manuellen Fahrzeugführungsaufgabe

Die erste Bearbeitungsstufe des Modells ist die Wahrnehmung (siehe Abbildung 4.5). Die Teilaufgaben des Fahrers bestehen in dieser Stufe darin, die Umwelt und den Zustand des Eigenfahrzeuges mittels seiner Wahrnehmungskanäle wahrzunehmen und die Informationen in einem geeigneten internen Abbild abzulegen.

In der Bearbeitungsstufe Situationserfassung (siehe Abbildung 4.5) erfolgt die Interpretation der Situation im Kontext der Fahrzeugführungsaufgabe. Diese ist die Basis für die Erstellung einer Zusammenfassung der Situation auf die für die Fahrzeugführung wesentlichen Bestandteile und die Abschätzung zukünftiger Zustände durch eine modellbasierte Prädiktion (vergleiche Aufbau des Situationsbewusstseins nach Endsley [57]).

In der nächsten Bearbeitungsstufe erfolgt die Generierung und Auswahl von Handlungsalternativen. Diese Stufe ist in Anlehnung an die Drei-Ebenen-Modelle in vier Bearbeitungsebenen hierarchisiert (siehe Abbildung 4.5). Die Bearbeitungsebene Navigation adressiert analog zum Drei-Ebenen-Modell nach Donges [47] die Planung einer Route durch ein Straßennetzwerk, um ein bestimmtes Ziel zu erreichen.

Die im Drei-Ebenen-Modell nach Donges [47] spezifizierte Bahnführungsebene wird in die Bearbeitungsebenen Manöverplanung und (Kurzzeit-) Trajektorienplanung aufgeteilt (siehe Abbildung 4.5). Auf der Bearbeitungsebene Manöverplanung erfolgt die Planung, welche Manöver als nächstes auszuführen sind. Auf der Bearbeitungsebene (Kurzzeit-) Trajektorienplanung wird auf dieser Basis die detaillierte Trajektorienplanung durchgeführt. Die beiden Ebenen unterscheiden sich hinsichtlich des Zeithorizonts, der Beschreibung und des Detaillierungsgrades der Handlung sowie der Anforderungen hinsichtlich des benötigten Wissens und der Aufgabenbearbeitung.

Um die Aufgabe der Bearbeitungsebene Manöverplanung genauer zu betrachten, muss zunächst der Manöverbegriff definiert werden.

Definition 4.1. Manöverbegriff: *Ein Manöver ist eine begriffliche Beschreibung einer Fahrzeugbewegung im Kontext der Umgebung des Fahrzeuges. Die Fahrzeugbewegung ist durch ein Manöver nicht genau spezifiziert, ein Manöver umfasst vielmehr viele gleichartige Bewegungen im Kontext der Umgebung.*

Beispiele für Manöverbegriffe sind „Fahrstreifen folgen“, „Fahrstreifen wechseln“ und „Fahrzeug folgen“. Aufgrund dieser Abstraktion können Planungen einfacher ausgeführt werden. Die Zuordnung der Begriffe macht eine Kommunikation mit dem Beifahrer oder anderen Verkehrsteilnehmern zur Abstimmung der Fahrstrategie erst möglich. So genügt beispielsweise die durch Blinken angezeigte Absicht eines Fahrstreifenwechsels aus, um einem anderen Verkehrsteilnehmer ein hinreichend genaues Bild der eigenen Fahrstrategie zu vermitteln. Daher ist im Rahmen der Betrachtung der Abstimmung der Fahrstrategie mit der kooperativen Automation diese Bearbeitungsebene von besonderer Bedeutung.

Auf Basis der auf der Bearbeitungsebene Navigation geplanten Route und des Wertesystems des Fahrers werden auf der Bearbeitungsebene Manöverplanung die Entscheidungen getroffen, welche Manöver als Nächstes ausgeführt werden sollen. So wird zum Beispiel entschieden, ob dem aktuellen Fahrstreifen weiterhin gefolgt werden oder als nächstes Manöver ein Fahrstreifenwechsel erfolgen soll. Um diese Entscheidungen treffen zu können, muss das Wissen, welche Manöver als Nächstes durchführbar wären, für die Aufgabenbearbeitung vorhanden sein. Die Häufigkeit von Entscheidungen auf der Bearbeitungsebene Manöverplanung hängt von der Entwicklung der Situation ab. Der Zeithorizont einer Entscheidung ist ebenfalls situationsabhängig. Als Ergebnis der Bearbeitung auf der Bearbeitungsebene Manöverplanung steht eine Manöverfolge zur Verfügung, die eine Grobform der geplanten Fahrzeugbewegung beschreibt.

Mit Hilfe der Manöverfolge wird die auf der Bearbeitungsebene (Kurzzeit-) Trajektorienplanung ausgeführte detaillierte Trajektorienplanung und damit die Erzeugung der Feinform der geplanten Fahrzeugbewegung koordiniert. Durch die Trajektorie wird analog zum Ausgang der von Donges [47] spezifizierten Bahnführungsebene der Sollzustand des Eigenfahrzeuges über die Zeit beschrieben. Für die verschiedenen Manöver liegen auf der Bearbeitungsebene (Kurzzeit-) Trajektorienplanung Bewegungsentwürfe vor, die mittels interner dynamischer Modelle an die vorliegende Situation angepasst werden. Es liegt das Wissen vor, wie genau ein Manöver umgesetzt werden kann. Die Planung der Trajektorie wird für eine konstante Antizipationszeit (zum Beispiel 2 bis 3 s) kontinuierlich durchgeführt, sie ist nicht durch einen Manöverübergang in der Manöverfolge begrenzt. Die kontinuierliche Planung der Trajektorie erfolgt gleichzeitig zu den Entscheidungen auf der Bearbeitungsebene Manöverplanung.

Basierend auf der von der Bearbeitungsebene (Kurzzeit-) Trajektorienplanung zur Verfügung gestellten Trajektorie werden auf der Bearbeitungsebene Steuerung / Regelung Stellaktionen generiert, um das Fahrzeug der Trajektorie folgen zu lassen (siehe Abbildung 4.5). Die Benennung der Ebene als Steuerungs- und Regelungsebene soll deutlich machen, dass regelungstechnisch betrachtet auf dieser Ebene sowohl Steuerungen als auch Regelungen zum Einsatz kommen können. Die Aufgabe der Ebene ist analog zu der Aufgabe der Stabilisierungsebene im Drei-Ebenen-Modell nach Donges [47]. Als Stellgrößen können zum Beispiel der Lenkwinkel und die Stellung des Gas- und Bremspedals dienen.

Die Aufgabe der abschließenden Bearbeitungsstufe Interaktionsumsetzung (siehe Abbildung 4.5) ist die Übermittlung der Stellaktionen des Fahrers zum Fahrzeug. Es muss eine Übersetzung aus der internen Repräsentation der Stellaktion erfolgen, um über das Hand-Arm-System und das Fuß-Bein-System die Informationen an das Fahrzeug übermitteln zu können.

4.2.2 Funktionale Systemarchitektur der kooperativen Automation

Das im vorigen Kapitel 4.2.1 beschriebene Modell der manuellen Fahrzeugführungsaufgabe wird nun zur Erstellung der funktionalen Systemarchitektur der kooperativen Automation genutzt. Das Ziel ist einerseits, eine kognitiv kompatible Architektur zu erstellen und andererseits diverse Kommunikationsmöglichkeiten zwischen Fahrer und Automation vorzusehen, um so den gemeinsamen Aufbau des Situationsbewusstseins, die gemeinsame Handlungsplanung und die gemeinsame Handlungsausführung zu ermöglichen. Als Teil der gemeinsamen Handlungsausführung soll die funktionale Systemarchitektur auch die Möglichkeit bieten, verschiedene Kontrollanteile zu realisieren.

Abbildung 4.6 zeigt analog zu Abbildung 3.1 den Fahrer und die Automation als die beiden Akteure, die gemeinsam das Fahrzeug in der Umwelt führen. Auf der Seite des Fahrers ist das im vorigen Kapitel 4.2.1 entwickelte Modell (siehe Abbildung 4.5) dargestellt. Die Interaktionsumsetzung auf der Seite des Fahrers dient nun nicht nur zur Steuerung des Fahrzeuges, sondern auch zur Kommunikation mit der kooperativen Automation.

Die Aufgaben der einzelnen Bearbeitungsstufen und -ebenen sind auf der Seite der Automation kompatibel zu denen des Fahrers. Im Folgenden werden diese detailliert beschrieben.

4.2.2.1 Wahrnehmung

Die Aufgabe der Bearbeitungsstufe Wahrnehmung (siehe Abbildung 4.6) besteht in der Gewinnung von Informationen über die Umwelt und den Zustand des Eigenfahrzeuges mittels verschiedener Sensoren. Diese Informationen werden für die weitere Bearbeitung der Fahrzeugführungsaufgabe in einem integrierten Modell bereitgestellt. Durch den Rückkanal der Bearbeitungsstufe Situationserfassung wird die Möglichkeit angedeutet, die Aufmerksamkeit der Sensorik auf die für die Aufgabenbearbeitung interessanten Bereiche zu lenken (siehe zum Beispiel [46]).

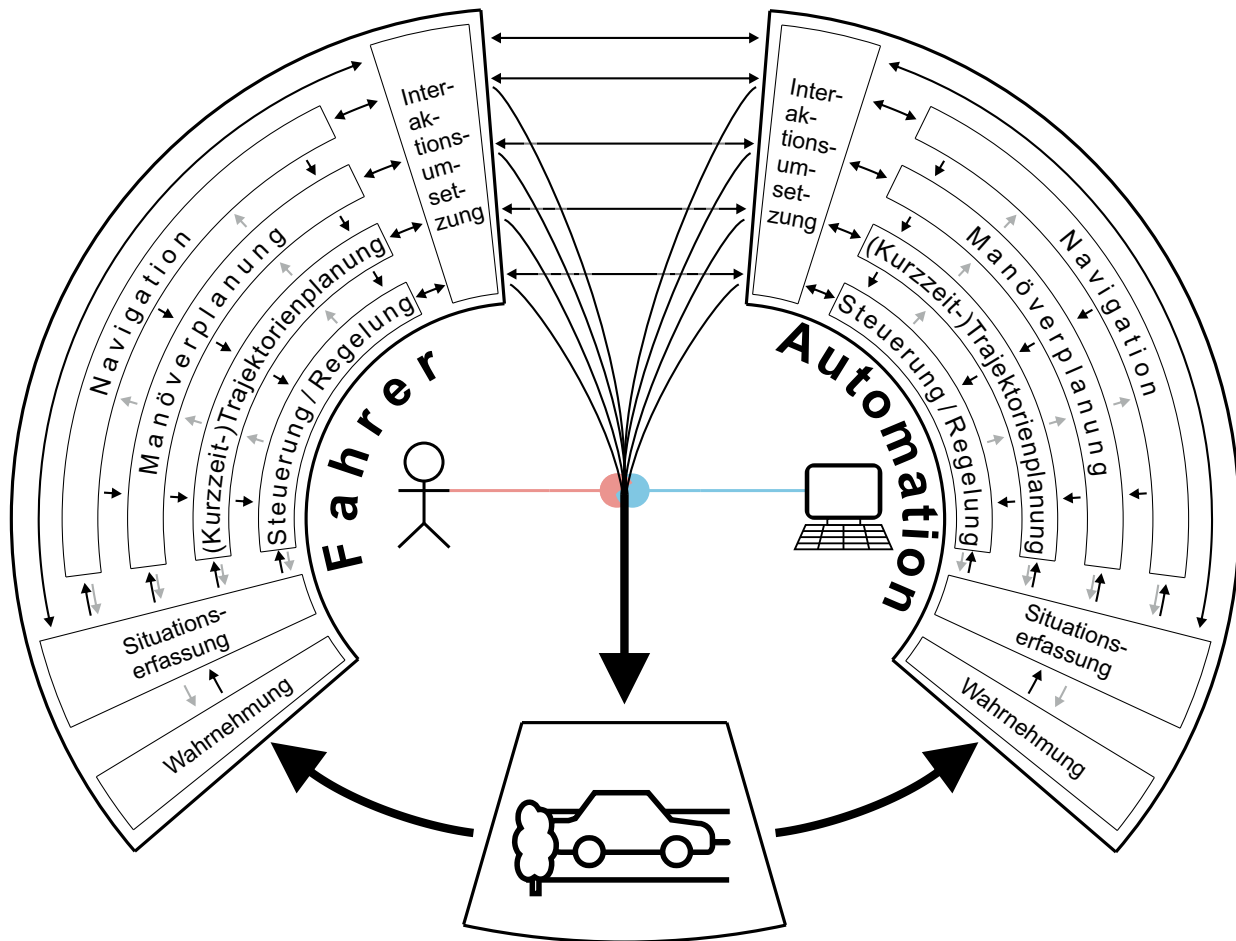


Abbildung 4.6: Modell der Aufgaben des Fahrers, funktionale Systemarchitektur der kooperativen Automation und gemeinsam geführtes Fahrzeug in der Umwelt

4.2.2.2 Situationserfassung

Die Aufgabe der Bearbeitungsstufe Situationserfassung (siehe Abbildung 4.6) ist die Interpretation der Situation im Kontext der Fahrzeugführungsaufgabe. Die hinsichtlich der Fahrzeugführungsaufgabe relevanten Eigenschaften der Situation werden dazu bestimmt und aufgrund ihrer Bedeutung für die Fahrzeugführung mit Informationen angereichert. Es kann beispielsweise eine Auswahl des zu beachtenden Vorderfahrzeuges erfolgen, die Bestimmung der Time to Collision (TTC) des Eigenfahrzeuges bezüglich anderer Fahrzeuge oder die Ermittlung einer für die Querführung relevanten Querabweichung des Eigenfahrzeuges von der Fahrstreifenmitte. Diese kontextbezogene Beschreibung der Situation als Erweiterung des Umfeldmodells wird im Weiteren als relevante Situationsmerkmale bezeichnet.

Neben der Bestimmung der relevanten Situationsmerkmale besteht eine weitere Aufgabe der Situationserfassung in der Ermittlung von Merkmalen, welche die Bedeutung der Gesamtsituation hinsichtlich der Fahrzeugführungsaufgabe beschreiben. Die Kritikalität beschreibt dazu die von der Situation ausgehende Gefährdung für das Eigenfahrzeug. Sie bildet eine Grundlage für die Interaktionsumsetzung, um zum Beispiel Warnungen für den Fahrer zu generieren.

Damit Fahrer und kooperative Automation ein gemeinsames Situationsbewusstsein aufbauen können, ist eine Kommunikation mit dem Fahrer mittels der Interaktionsumsetzung auf dieser Bear-

beutungsstufe der Fahraufgabe vorgesehen. Damit der Fahrer die von der Automation übermittelten Informationen verstehen kann, müssen diese kompatibel zum Fahrer sein. Des Weiteren sollten die Informationen so aufbereitet werden, dass die für die aktuelle Situation wichtigen Informationen hervorgehoben werden können. So kann dem Fahrer zum Beispiel ein abstrahiertes Modell des Umfelds in einer Draufsicht angezeigt werden, um das gemeinsame Situationsbewusstsein zu fördern. Die relevanten Situationsmerkmale bieten die Grundlage für diese Kommunikation mit dem Fahrer. Den folgenden vier Bearbeitungsebenen werden als Ergebnis der Situationserfassung zusätzlich zum Umfeldmodell die relevanten Situationsmerkmale zur Verfügung gestellt. Durch die Rückkanäle der vier Bearbeitungsebenen wird die Möglichkeit angedeutet, dass von diesen gezielt Informationen angefordert werden können. Außerdem besteht dadurch die Möglichkeit, dass bestimmte der in der Situationserfassung berechneten Informationen in Abhängigkeit von den auf den vier Bearbeitungsebenen generierten Handlungsplänen angepasst werden können.

4.2.2.3 Navigation

Die Aufgabe der Bearbeitungsebene Navigation (siehe Abbildung 4.6) ist die Planung einer Route durch das Straßennetzwerk, um ein bestimmtes Ziel zu erreichen. Die Aufgabe ist damit analog zur Aufgabe des Fahrers auf der gleichen Bearbeitungsebene. Die gemeinsame Routenerstellung wird durch die vorgesehene Kommunikationsverbindung zwischen Fahrer und Automation mittels der Interaktionsumsetzung ermöglicht. In der vorliegenden Arbeit wird die Bearbeitungsebene Navigation nicht detaillierter betrachtet.

4.2.2.4 Manöverplanung

Auf der Bearbeitungsebene Manöverplanung (siehe Abbildung 4.6) erfolgt analog zum Fahrer die Planung, welche Manöver als Nächstes auszuführen sind (zum Manöverbegriff siehe Definition 4.1). Dabei werden im System festgelegte Ziele sowie die von der Bearbeitungsebene Navigation bestimmte Route beachtet. Um die gemeinsame Handlungsplanung zu ermöglichen, werden sämtliche für die Automation durchführbaren Manöver bestimmt und mit einem Valential bewertet (siehe Kapitel 4.1).

Definition 4.2. Von der Automation durchführbares Manöver: *Ermöglichen die Eigenschaften einer Situation unter Berücksichtigung der Automationseigenschaften die Durchführung eines Manövers für die Automation, so ist dieses Manöver in dieser Situation ein für die Automation durchführbares Manöver.*

Damit die bestimmten Manöver der Kompatibilitätsforderung genügen, müssen kompatible Ziele, Werte und Methoden eingesetzt werden. Durch die mittels der Interaktionsumsetzung eingerichtete explizite Kommunikation mit dem Fahrer auf dieser Ebene kann gemeinsam die Entscheidung getroffen werden, welches der für die Automation durchführbaren Manöver von der Automation ausgeführt werden soll. Die Umsetzung dieses Manövers kann daraufhin von der Automation durch ihr Wirken auf das Fahrzeug angestrebt werden, wodurch es zum von der Automation ausgeführten Manöver wird:

Definition 4.3. Von der Automation ausgeführtes Manöver: *Das von der Automation ausgeführte Manöver ist das Manöver, dessen Umsetzung die Automation durch ihr Wirken auf das Fahrzeug anstrebt.*

Des Weiteren erfolgt im Rahmen der Manöverplanung die Erkennung des aktuell vom Fahrzeug gefahrenen Manövers. Dieses Manöver kann genutzt werden, um das Verhalten der Automation anzupassen und damit die implizite Kommunikation (siehe Kapitel 3.2.6) zu realisieren. Da sowohl der Fahrer als auch die Automation aufgrund der gemeinsamen Handlungsausführung auf das Fahrzeug wirken können, ist das aktuell vom Fahrzeug gefahrene Manöver das Resultat des Wirkens beider Akteure. Aufgrund dieses Zusammenwirkens kann nicht davon ausgegangen werden, dass das von der Automation ausgeführte Manöver auch das aktuell vom Fahrzeug gefahrene Manöver ist. In der vorliegenden Arbeit wird das aktuell vom Fahrzeug gefahrene Manöver wie folgt definiert:

Definition 4.4. Vom Fahrzeug aktuell gefahrenes Manöver: *Das aktuell vom Fahrzeug gefahrene Manöver ist das Manöver, das ein außerhalb des betrachteten Fahrzeuges positionierter Beobachter als das aktuell vom Fahrzeug im Kontext der Umgebung gefahrene Manöver erkennen würde.*

Um mittels der Manöver kommunizieren zu können, muss auf Seiten der Automation die Einteilung und Ausprägung der Manöver kompatibel mit der Einteilung und Ausprägung der Manöver des Fahrers sein. Das grundsätzliche Verständnis des Manöverbegriffs muss auf beiden Seiten gleich sein, um eine Kommunikation auf der Basis von Manövern zu ermöglichen.

In der Verhaltensgenerierung der Automation bildet die Bearbeitungsebene Manöverplanung eine regelbasierte Schicht, durch die die Auswahl und Parametrierung der Algorithmen auf den tieferen Ebenen gesteuert wird. Dies ermöglicht der Automation verschiedenste Situationen zu bewältigen und diverse Manöver auszuführen. Außerdem ergibt sich dadurch die Möglichkeit, die Komplexität und damit auch die benötigte Rechenzeit der auf der nächsttieferen Ebene angesiedelten Trajektorienplanungsalgorithmen zu reduzieren. Damit wird die durchgängige parallele Erzeugung mehrerer Handlungspläne sowohl auf der Bearbeitungsebene Manöverplanung als auch auf der Bearbeitungsebene (Kurzzeit-) Trajektorienplanung ermöglicht.

Als Ergebnis der Manöverplanung steht als Erweiterung der Manöverfolge ein Manöverbaum zur Verfügung, in dem die für die Automation durchführbaren Manöver sowie das aktuell vom Fahrzeug gefahrene Manöver dargestellt sind (für eine detaillierte Erläuterung des Manöverbaumes siehe Kapitel 4.3).

Die von den jeweiligen tieferen Ebenen ausgehenden Rückkanäle (siehe Abbildung 4.6) deuten die Möglichkeit an, dass ein Handlungsplan auf einer höheren Ebene durch auf einer tieferen Ebene bestimmte Informationen verändert werden kann. Stellt zum Beispiel ein detaillierter arbeitender Trajektorienplanungsalgorithmus fest, dass ein Manöver entgegen dem Ergebnis der Bearbeitungsebene Manöverplanung nicht durchführbar ist, kann diese Information verwendet werden, um die Manöverplanung anzupassen.

4.2.2.5 (Kurzzeit-) Trajektorienplanung

Die Aufgabe der Bearbeitungsebene (Kurzzeit-) Trajektorienplanung (siehe Abbildung 4.6) besteht analog zum Fahrer in der detaillierten Planung von Trajektorien für die Fahrzeugfortbewegung. Für jedes auf der Bearbeitungsebene Manöverplanung bestimmte durchführbare Manöver wird bis zu einem Planungshorizont eine Trajektorie erzeugt. Damit ergibt sich die Anforderung, dass die verwendeten Planungsalgorithmen hinsichtlich der benötigten Rechenzeit die parallele Erzeugung von jeweils mehreren Trajektorien ermöglichen. Das Valential wird als Eigenschaft für die Trajektorie übernommen. Als Ergebnis der (Kurzzeit-) Trajektorienplanung liegt somit nicht nur eine Trajektorie vor, sondern ein Trajektorienvalentialfeld (für eine detaillierte Erläuterung des Trajektorienvalentialfeldes siehe Kapitel 4.3), in dem mehrere Trajektorien dargestellt werden können. Das jeweilige Manöver steuert die Auswahl und Parametrierung des Planungsalgorithmus.

Die für ein Manöver erzeugte Trajektorie muss kompatibel sein zur Trajektorie, die der Fahrer beim Fahren des Manövers erzeugen würde. Um dies zu gewährleisten, müssen kompatible Ziele, Werte und Methoden bei der Trajektorienplanung berücksichtigt werden.

Für die gemeinsame Handlungsplanung ist auch auf dieser Ebene mittels der Interaktionsumsetzung eine explizite Kommunikation mit dem Fahrer vorgesehen. Damit ergibt sich die Möglichkeit, dass Fahrer und Automation gemeinsam über die Form einzelner Trajektorien entscheiden. Der Fahrer kann dadurch Trajektorien adaptieren und so die Eigenschaften einer gemeinsam geplanten Handlung beeinflussen. Für diese gemeinsame Trajektorienplanung muss die Automation neben einer Trajektorie für ein bestimmtes Manöver auch Wertebereiche von für sie möglichen Parametern für das Manöver oder die Trajektorie bestimmen. Diese bilden den Rahmen für die gemeinsame Planung. Des Weiteren besteht durch die Kommunikation auf dieser Ebene für die Interaktionsumsetzung auch die Möglichkeit, dem Fahrer die berechneten Trajektorien anzuzeigen, um die gemeinsame Planung weiter zu unterstützen.

4.2.2.6 Steuerung / Regelung

Die auf der Bearbeitungsebene Steuerung / Regelung (siehe Abbildung 4.6) bearbeitete Aufgabe ist ebenfalls analog zu der auf Seiten des Fahrers beschriebenen Aufgabe. Durch die Kombination von Steuerungs- und Regelungsalgorithmen werden Stellaktionen generiert, um das Fahrzeug einer Trajektorie folgen zu lassen. Es wird für jedes aktuell durchführbare Manöver eine Stellaktion berechnet, als deren Eigenschaft das Valential des Manövers übernommen wird. Die Stellaktionen werden im Stellaktionsvalentialfeld abgelegt (für eine detaillierte Erläuterung des Stellaktionsvalentialfeldes siehe Kapitel 4.3). Die dem ausgeführten Manöver der Automation zugehörige Stellaktion bildet die ausgeführte Stellaktion der Automation und wird im Stellaktionsvalentialfeld entsprechend markiert.

Durch das Manöver wird auf dieser Bearbeitungsebene, ebenso wie auf der Ebene (Kurzzeit-) Trajektorienplanung, die Auswahl und Parametrierung der Algorithmen gesteuert. Es bietet sich so unter anderem die Möglichkeit, für bestimmte Manöver Regelungsalgorithmen einzusetzen, die nicht auf einer geplanten Trajektorie basieren. Eine wichtige Forderung an die Regelungsalgorithmen und deren Parametrierung ist, dass die generierten Stellaktionen kompatibel zu denen des Fahrers sind.

Die gemeinsame Handlungsausführung von Fahrer und Automation erfordert, dass beide Partner auf die Stellgrößen des Fahrzeuges einwirken und so die Fahrzeugkontrolle gemeinsam ausüben können (siehe Kapitel 3.2.3). Für die Realisierung der gemeinsamen Handlungsausführung sind die Bearbeitungsebene Steuerung / Regelung und die Bearbeitungsstufe Interaktionsumsetzung zuständig. Auf der Bearbeitungsebene Steuerung / Regelung werden die Stellgrößen in Abhängigkeit der aktuellen Kontrollanteile von Fahrer und Automation aufgrund der von der Interaktionsumsetzung ermittelten Einstellungen an den Stellteilen des Fahrers und des Stellaktionsvalentialfeldes der Automation bestimmt und den Akteuren des Fahrzeuges übermittelt. Die Verteilung der Kontrollanteile wird durch die Interaktionsumsetzung vorgegeben.

Für eine aufeinander abgestimmte Erzeugung der Stellaktionen müssen die Partner sowohl über die Kenntnis der Stellaktionen des jeweils anderen Partners verfügen als auch über die Kenntnis der aktuellen Kontrollanteile. Zum Austausch der Stellaktionen dient die auf der Bearbeitungsebene Steuerung / Regelung vorgesehene explizite Kommunikation. Durch die aufeinander abgestimmte Erzeugung der Stellaktionen können negative Interferenzen bei der gemeinsamen Handlungsausführung vermieden werden, die zum Beispiel zu Instabilitäten bei der Fahrzeugführung führen können. Auch bei einer Änderung der Kontrollanteile lassen sich durch diese Abstimmung unerwünschte sprunghafte Änderungen der Stellgrößen des Fahrzeuges vermeiden.

4.2.2.7 Interaktionsumsetzung

Die Bearbeitungsstufe Interaktionsumsetzung der Automation (siehe Abbildung 4.6) ist zuständig für die Umsetzung der Kommunikation mit dem Fahrer. Zur Ermöglichung der Kommunikation mit dem Fahrer muss die Mensch-Maschine-Schnittstelle der Automation kompatibel zu den äußeren Systemgrenzen des Fahrers gestaltet sein (äußere Kompatibilität). Die Kommunikation kann Inhalte umfassen, die auf Informationen von jeder der vier vorgestellten Bearbeitungsebenen und der Bearbeitungsstufe der Situationserfassung basieren.

Die Gestaltung der Kommunikation für die gemeinsame Handlungsplanung in Form einer Verhandlung zwischen den Partnern ist die Aufgabe des Arbiters, der einen wichtigen Bestandteil der Bearbeitungsstufe Interaktionsumsetzung bildet (für detaillierte Informationen zum Konzept der Arbitrierung siehe zum Beispiel Kelsch et al. [110]). Durch den Arbitrer wird in enger Zusammenarbeit mit den einzelnen Bearbeitungsebenen der Automation am Ende der Verhandlung eine stabile Entscheidung hinsichtlich des gemeinsamen Handlungsplanes gewährleistet.

Um die gemeinsame Handlungsausführung gemeinsam mit der Bearbeitungsebene Steuerung / Regelung zu realisieren, ermittelt die Interaktionsumsetzung die Einstellungen an den Stellteilen des Fahrers und übermittelt diese der Bearbeitungsebene Steuerung / Regelung. Die Verteilung der Kontrollanteile wird außerdem von der Interaktionsumsetzung gesteuert und der Bearbeitungsebene Steuerung / Regelung übermittelt. Es ist die Aufgabe der Interaktionsumsetzung, den Fahrer über die aktuelle Verteilung der Kontrollanteile zu informieren. Da die Kontrollanteile der beiden Partner variabel sind und somit zur Laufzeit verändert werden können, sorgt die Interaktionsumsetzung auch für die Steuerung der Veränderung der jeweiligen Kontrollanteile und damit die Realisierung von Transitionen zwischen verschiedenen Verteilungen der Kontrollanteile. Um zu gewährleisten, dass der Fahrer über die aktuelle Verteilung der Kontrollanteile informiert ist, ist eine geeignete

Gestaltung der Kommunikation mit dem Fahrer bei diesen Transitionen von besonderer Bedeutung (für detaillierte Informationen zu Transitionen siehe zum Beispiel Schieben et al. [176]).

Weitere Aufgaben der Bearbeitungsstufe Interaktionsumsetzung der Automation sind das Erkennen von Fahrerabsichten sowie des Fahrerzustandes durch das Beobachten des Fahrers und seiner Aktionen. Die Fahrerabsichtserkennung ermöglicht eine auf den erkannten Fahrerabsichten basierende Anpassung der von der Automation erstellten Handlungspläne zur Unterstützung der gemeinsamen Handlungsplanung (siehe Kapitel 3.2.2). Aufgrund einer durch die Fahrerzustandserkennung festgestellten deutlich reduzierten Vigilanz des Fahrers kann zum Beispiel der Kontrollanteil der Automation erhöht werden.

4.3 Repräsentationen des Automationsverhaltens für die Kooperation mit dem Fahrer

Die in diesem Kapitel vorgestellten Repräsentationen des Automationsverhaltens für die drei Bearbeitungsebenen Manöverplanung, (Kurzzeit-) Trajektorienplanung und Steuerung / Regelung (siehe Kapitel 4.2.2) dienen sowohl der gemeinsamen Handlungsplanung als auch der gemeinsamen Handlungsausführung. Die Repräsentationen beschreiben für jede Bearbeitungsebene mittels der in Kapitel 4.1 eingeführten Valentiale die für die Automation durchführbaren Handlungen sowie die von der Automation ausgeführte Handlung. Auf der Bearbeitungsebene der Manöverplanung erfolgt zusätzlich die Darstellung der aktuellen Handlung des Fahrzeuges.

Im Weiteren erfolgt die detaillierte Vorstellung des Manöverbaumes für die Bearbeitungsebene Manöverplanung (Kapitel 4.3.1), des Trajektorienvallentiafeldes für die Bearbeitungsebene (Kurzzeit-) Trajektorienplanung (Kapitel 4.3.2) sowie des Stellaktionsvallentiafeldes für die Bearbeitungsebene Steuerung / Regelung (Kapitel 4.3.3). Abschließend wird der Zusammenhang der einzelnen Repräsentationen herausgestellt (Kapitel 4.3.4).

Erste Überlegungen zu Repräsentationen des Automationsverhaltens für die Kooperation mit dem Fahrer wurden vom Autor dieser Arbeit bereits in [128] vorgestellt. Der vorliegende Abschnitt basiert auf diesen Überlegungen.

4.3.1 Manöverplanung: Manöverbaum

Auf der Bearbeitungsebene Manöverplanung (siehe Kapitel 4.2.2.4) beschreibt der in Abbildung 4.7 gezeigte Manöverbaum in einer integrierten Repräsentation die aktuelle Handlung des Fahrzeuges, die für die Automation durchführbaren Handlungen sowie die von der Automation ausgeführte Handlung. Das wahrscheinlich aktuell vom Fahrzeug gefahrene Manöver bildet das Wurzelmanöver des Baumes (siehe Definition 4.4). Als Knoten des Baumes bilden die durchführbaren Manöver die möglichen Folgemanöver. Ein aktuelles Folgemanöver ist ein Manöver, dessen Ausführung die Automation zum aktuellen Zeitpunkt beginnen könnte. Kanten zu zukünftigen Folgemanövern, die erst nach Eintreten einer bestimmten Vorbedingung (zum Beispiel nach Ablauf einer Zeit) aktiviert werden können, sind durch ein Δt markiert. Das Valentiale (Zahlenwert jeweils oben rechts am Manöver) drückt die Präferenzen der Automation bezüglich der durchführbaren Manöver aus. Das

Manöver mit dem höchsten Valential ist das automationspräferierte Manöver. Ist das Valential des wahrscheinlich aktuell vom Fahrzeug gefahrenen Manövers größer als 0, so kann dieses Manöver durch die Automation weiter ausgeführt werden. Die als Blätter im Baum angeordneten Folgemanöver bilden den Planungshorizont der Bearbeitungsebene Manöverplanung. Durch die Markierung „ausgeführt“ wird das von der Automation aktuell ausgeführte Manöver (siehe Definition 4.3) angezeigt.

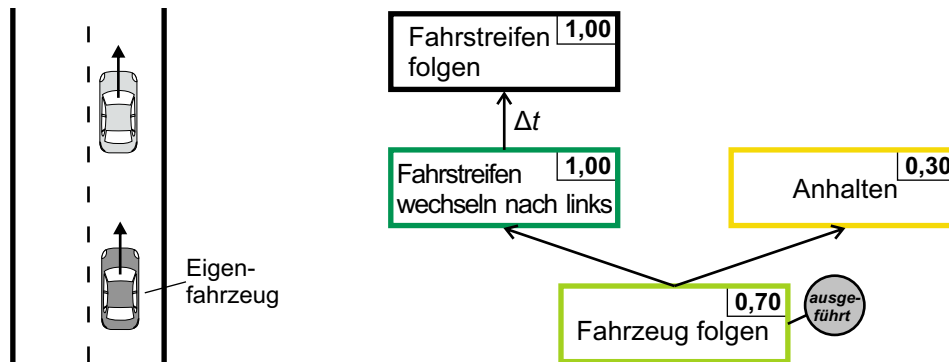


Abbildung 4.7: Beispielsituation und zugehöriger beispielhafter Manöverbaum (die farbliche Kennzeichnung der Manöver dient der Verdeutlichung ihrer Verbindung zu Trajektorienvalentialfeld und Stellaktionsvalentialfeld, die in den Abbildungen 4.9 und 4.10 gezeigt werden und über analoge Kennzeichnungen verfügen)

Im Beispiel in Abbildung 4.7 ist das Manöver „Fahrzeug folgen“ das aktuell vom Fahrzeug gefahrene Manöver. Durch das diesem Manöver zugeordnete Valential wird ausgedrückt, dass es aktuell weiter durchgeführt werden kann. Darüber hinaus ist das Manöver „Fahrzeug folgen“ auch das aktuell von der Automation ausgeführte Manöver. Neben dem Manöver „Fahrzeug folgen“ sind ebenso die Manöver „Fahrstreifen wechseln nach links“ und „Anhalten“ aktuell durchführbar. Das Manöver „Fahrstreifen folgen“ wird erst dann durchführbar, wenn die durch das Δt markierte Vorbedingung erfüllt ist. Als Vorbedingung dient in diesem Beispiel der Abschluss des Manövers „Fahrstreifen wechseln nach links“.

Abbildung 4.8 zeigt die zum Manöverbaum (Abbildung 4.7) analogen Manöverfolgen. Im Manöverbaum können mehrere alternative Handlungspläne gleichzeitig dargestellt werden. Eine Manöverfolge zeigt nur einen Handlungsplan. Manöverfolge 1 beschreibt die Fortführung des aktuell gefahrenen Manövers „Fahrzeug folgen“. Manöverfolge 2 stellt die Durchführung des Manövers „Anhalten“ nach dem gerade noch aktuell gefahrenen Manöver dar. Mit der Durchführung des Manövers „Anhalten“ wird direkt zum aktuellen Zeitpunkt begonnen. In Manöverfolge 3 wird nach der zum aktuellen Zeitpunkt beginnenden Durchführung des Manövers „Fahrstreifen wechseln nach links“ das Manöver „Fahrstreifen folgen“ durchgeführt. Auch hier ist als Wurzelmanöver das gerade noch aktuell gefahrene Manöver dargestellt.

Der Manöverbaum wird in der kooperativen Automation sowohl als Grundlage für die Kommunikation mit dem Fahrer als auch zur internen Kommunikation mit den tieferen Ebenen für die weitere Verhaltensgenerierung genutzt.

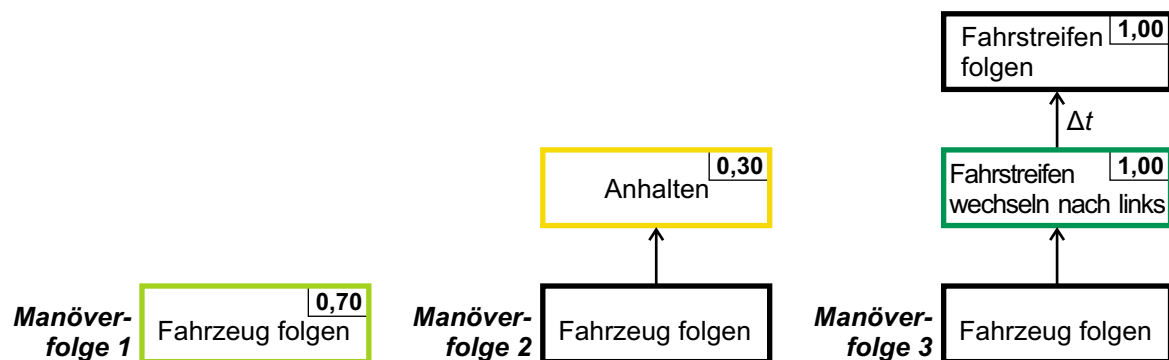


Abbildung 4.8: Zum beispielhaften Manöverbaum (Abbildung 4.7) analoge Manöverfolgen (die farbliche Kennzeichnung der Manöver dient der Verdeutlichung ihrer Verbindung zu Manöverbaum, Trajektorienvallentialfeld und Stellaktionsvallentialfeld, die in den Abbildungen 4.7, 4.9 und 4.10 gezeigt werden)

4.3.2 (Kurzzeit-) Trajektorienplanung: Trajektorienvallentialfeld

Das Trajektorienvallentialfeld (siehe Abbildung 4.9) beinhaltet die durch die Trajektorien repräsentierten durchführbaren Handlungen der Automation auf der Bearbeitungsebene (Kurzzeit-) Trajektorienplanung (siehe Kapitel 4.2.2.5). Die ausgeführte Handlung der Automation ist analog zur Markierung im Manöverbaum markiert. Jede Trajektorie ist einer Manöverfolge mit durchführbaren Manövern zugeordnet, dessen Vallentiale werden als Vallentiale für die Trajektorie übernommen. Die Trajektorie beschreibt die Fahrzeugfortbewegung bis zum zeitlichen Planungshorizont der Bearbeitungsebene (Kurzzeit-) Trajektorienplanung. Je nach Planungshorizont der betrachteten Manöverfolge wird daher nicht die gesamte Folge durch die Trajektorie beschrieben. Die Trajektorien werden in einem fahrzeugfesten Koordinatensystem dargestellt und beginnen an der aktuellen Eigenfahrzeugposition. Die Achse x_V des Koordinatensystems ist in Längsrichtung des Eigenfahrzeuges orientiert.

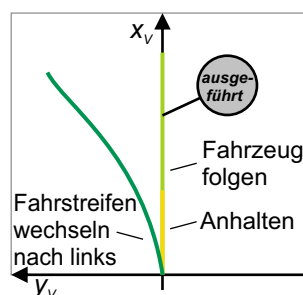


Abbildung 4.9: Beispielhaftes Trajektorienvallentialfeld (die farbliche Kennzeichnung der Trajektorien zeigt die Zuordnung zur jeweiligen im Manöverbaum in Abbildung 4.7 enthaltenen Manöverfolge)

4.3.3 Steuerung / Regelung: Stellaktionsvallentialfeld

Das in Abbildung 4.10 gezeigte Stellaktionsvallentialfeld wird auf der Bearbeitungsebene Steuerung / Regelung (siehe Kapitel 4.2.2.6) zur Darstellung der aktuell durchführbaren Handlungen sowie der ausgeführten Handlung der Automation eingesetzt. Im Stellaktionsvallentialfeld ist für

jedes aktuell von der Automation durchführbare Manöver eine Stellaktion enthalten. Die Darstellung dieser Stellaktionen erfolgt in Form von Stellaktionspunkten. Die aktuell von der Automation ausgeführte Stellaktion ist entsprechend markiert.

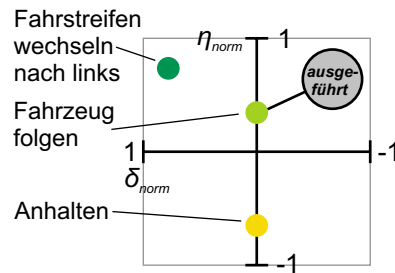


Abbildung 4.10: Beispielhaftes Stellaktionsvalentialfeld (die farbliche Kennzeichnung der Stellaktionspunkte zeigt die Zuordnung zu den im Manöverbaum in Abbildung 4.7 enthaltenen aktuell durchführbaren Manövern)

Der Stellaktionspunkt beschreibt jeweils in Längs- und Querrichtung die normierten Stellgrößen, auf die der Fahrer mittels der Stellteile und die Automation mittels der Aktoren Zugriff haben, um das Fahrzeug zu steuern. Der Stellaktionspunkt ist äquivalent zu dem Zustand der Stellteile, der die mit dem Stellaktionspunkt beschriebene Stellgröße erzeugt. Ein Stellaktionspunkt lässt sich somit in einen Zustand der Stellteile umrechnen. Im Folgenden wird in Querrichtung der normierte Lenkwinkel δ_{norm} verwendet. In Längsrichtung bezeichnet ein positives η_{norm} die normierte Beschleunigungsanforderung an den Antriebsstrang ($0 \leq \eta_{norm} \leq 1$) sowie ein negatives η_{norm} den normierten Bremsdruck ($-1 \leq \eta_{norm} \leq 0$). Das auf der Bearbeitungsebene Manöverplanung berechnete Valential wird als Eigenschaft des Stellaktionspunktes übernommen.

Einen ähnlichen Ansatz verwenden Holzmann et al. [99]. Sie beschreiben die möglichen Handlungen der Automation in einer „motion vectors map“. In dieser werden die möglichen Handlungen mittels des Lenkwinkels und der longitudinalen Beschleunigung dargestellt.

4.3.4 Zusammenhang der Repräsentationen

Die dargestellten Repräsentationen bieten drei verschiedene Sichtweisen auf die durchführbaren Handlungen sowie die ausgeführte Handlung der Automation. Diese Sichtweisen unterscheiden sich im durch die zugeordnete Bearbeitungsebene vorgegebenen Abstraktionsgrad. Eine Handlung wird auf diese Weise auf drei verschiedenen Abstraktionsgraden repräsentiert. Um den Zusammenhang herzustellen, sind die unterschiedlichen Repräsentationen einer Handlung untereinander verbunden (in den Abbildungen 4.7, 4.8, 4.9 und 4.10 durch die farbliche Kennzeichnung dargestellt). Dies ermöglicht es der kooperativen Automation, bei der Gestaltung der expliziten Kommunikation mit dem Fahrer die jeweils am besten geeignete Repräsentation der Handlung zu nutzen.

4.4 Entwicklung kompatibler Ziele, Werte und Methoden für die kooperative Automation

Die folgenden Überlegungen dienen der weiteren technischen Konkretisierung des Kooperations ausmachenden Elementes Kompatibilität. Sie adressieren die Kompatibilität der Ziele, Werte und Methoden der kooperativen Automation, welche Bestandteile der inneren Kompatibilität sind (siehe Kapitel 3.2.1). Die Kompatibilität der Ziele, Werte und Methoden ist für die Generierung kompatibler Handlungspläne und Handlungen durch die kooperative Automation auf den einzelnen Bearbeitungsebenen von entscheidender Bedeutung.

Um die geforderte Kompatibilität zu erreichen, lässt sich die im Folgenden beschriebene Vorgehensweise anwenden, die in Abbildung 4.11 dargestellt wird. Nach der Festlegung des Anwendungsgebietes der zu entwickelnden kompatiblen Ziele, Werte und Methoden bilden Ergebnisse aus Analysen des Fahrverhaltens von Fahrern den Ausgangspunkt für die Entwicklung. Diese werden ergänzt durch das Abfragen von Nutzererwartungen. Anschließend erfolgt die Evaluierung und weitere Verbesserung der Kompatibilität mittels Usability Untersuchungen mit Probanden in einem iterativen Prozess. In diesem Prozess wechseln sich Entwicklungs- und Evaluierungsphasen so lange ab, bis in einer Evaluierungsphase eine hinreichende Kompatibilität der entwickelten kompatiblen Ziele, Werte und Methoden festgestellt wurde. Die Vorgehensweise gliedert sich damit in den in dieser Arbeit generell angewendeten iterativen Entwicklungsprozess ein (siehe dazu Abbildung 1.4).

Ergebnisse aus Analysen des Fahrverhaltens von Fahrern als Grundlage

Ergebnisse aus Analysen des Fahrverhaltens von Fahrern im Kontext des Verkehrsraumes, der Verkehrsregeln und der übrigen Verkehrsteilnehmer bilden die Grundlage für die Entwicklung der kompatiblen Ziele, Werte und Methoden. Von besonderem Interesse für die kompatible Auslegung sind die Eigenschaften der Manöver des Fahrers, also sein Fahrstil, und welche Ursachen für diese Eigenschaften verantwortlich sind. Zu den Ursachen zählt die Frage, auf Basis welcher Informationen und mit welcher Ausprägung dieser Informationen Entscheidungen getroffen oder Handlungspläne erstellt werden. Die Informationen über die Eigenschaften und Ursachen können aus Versuchsfahrten mit Probanden in einem mit Sensorik zur Beobachtung des Fahrers, des Fahrzeuges und des Umfeldes ausgestatteten Versuchsfahrzeug gewonnen werden. Weitere Daten liefern Beobachtungen des Verkehrsflusses sowie physiologische Untersuchungen des Fahrers. Auf diesen Gebieten finden sich in der Literatur zahlreiche Arbeiten, die verschiedenste Aspekte mit unterschiedlichen Zielrichtungen beleuchten.

Die Zielsetzung bei der Entwicklung von kompatiblen Zielen, Werten und Methoden besteht nicht in der exakten Umsetzung der aus den Analysen des Fahrverhaltens von Fahrern gewonnenen Kenntnisse und damit nicht im Aufbau eines Fahrermodells, welches das Verhalten eines Fahrers möglichst genau abbildet. Im Unterschied dazu werden auf Basis der Ergebnisse Ziele, Werte und Methoden für die kooperative Automation entwickelt, die zu denen des Fahrers passen, also kompatibel sind. Dies bedeutet konkret, dass negative Phänomene, die beim manuellen Fahren auftreten, nicht abgebildet werden. So werden zum Beispiel schnellere durch die Automation zu realisierende

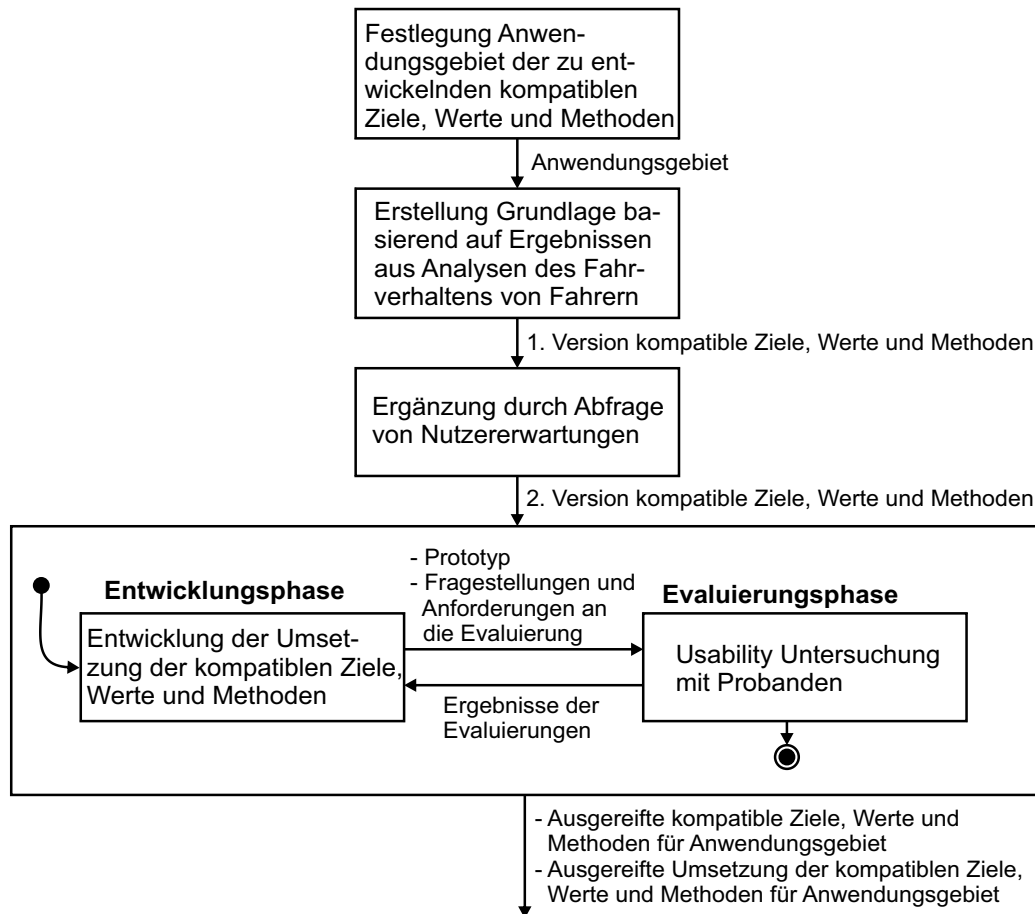


Abbildung 4.11: Übersicht der Vorgehensweise zur Entwicklung kompatibler Ziele, Werte und Methoden

Reaktionszeiten nicht künstlich verlängert. Des Weiteren genügt daher zur Erfüllung der Kompatibilitätsforderung eine normative Betrachtung.

Ein Beispiel für konkrete zu berücksichtigende kompatible Werte sind von der Automation realisierte Beschleunigungen. Kompatible Beschleunigungen bedeuten nicht die genaue Abbildung der von Fahrern gefahrenen Beschleunigungen. Bei Fahrern kann der Effekt beobachtet werden, dass das Beschleunigungspotential in einer Notsituation nicht vollständig ausgenutzt wird und deswegen die Kollision nicht vermieden werden kann [31]. Das kompatible Verhalten der Automation beinhaltet dagegen in einer Notsituation die volle Ausnutzung des Beschleunigungspotentials des Fahrzeuges, um eine Kollision zu verhindern. Die vom Fahrer in unkritischen Fahrsituationen realisierten Beschleunigungen können dagegen direkt für die von der Automation in den gleichen Situationen genutzten kompatiblen Werte verwendet werden. So lassen sich kompatible angenehme und maximale Beschleunigungen für diese Situationen festlegen. Dieses Beispiel zeigt zudem die Notwendigkeit der Berücksichtigung der Situation durch die kooperative Automation, um kompatibles Verhalten durch die Auswahl der passenden kompatiblen Werte zu erzeugen. Hinsichtlich der entwickelten Algorithmen zur Verhaltensgenerierung ergibt sich die Anforderung, dass die kompatiblen Werte explizit modelliert werden. Nur so lassen sich die Kenntnisse gezielt umsetzen sowie spätere Optimierungen der kompatiblen Werte gezielt vornehmen.

Um kompatible Methoden zu entwickeln, ist die Ursache der gefahrenen Beschleunigungen von Bedeutung. Für die Entwicklung einer Methode zur Trajektorienplanung für ein Manöver ist zum Beispiel die Kenntnis der Abhängigkeit der vom Fahrer gefahrenen Querschleunigung von der Straßengeometrie [53, 149] von Bedeutung. Kenntnisse dieser Art sollten direkt bei der Neuentwicklung von Algorithmen einfließen, da sie diese Algorithmen maßgeblich beeinflussen können. Ein nachträgliches Hinzufügen der Berücksichtigung solcher Kenntnisse zu bestehenden Algorithmen ist meistens aufwändiger, wenn nicht sogar unmöglich.

Für die Automation zu berücksichtigende kompatible Ziele sind zum Beispiel die von Huguenin [101] genannten Ziele eines Fahrers bei der Fahrzeugführung: schnell Vorwärtskommen, sicher Vorwärtskommen, Beachtung der Verkehrsregeln und partnerschaftlich Fahren. Diese sind insbesondere bei der Auswahl von Handlungen zu berücksichtigen. Um die Erkenntnisse über die kompatiblen Ziele umsetzen zu können, müssen diese explizit in der Automation modelliert werden.

Ergänzung durch Abfrage von Nutzererwartungen

In Ergänzung zu den aus den Analysen des Fahrverhaltens von Fahrern gewonnenen Erkenntnissen lassen sich durch die Abfrage von Nutzererwartungen weitere Anhaltspunkte zur kompatiblen Auslegung gewinnen. Dazu können zum Beispiel Probanden befragt werden, welches Automationsverhalten sie in bestimmten Situationen erwarten würden. Um die Probanden dabei zu unterstützen, ist es hilfreich, sie im Simulator die betreffenden Situationen manuell durchfahren zu lassen. Für die kompatible Auslegung sind insbesondere auch Unterschiede in dem vom Fahrer von der Automation erwarteten Fahrverhalten zum Fahrverhalten eines Fahrers von Bedeutung.

Evaluierung und weitere Verbesserung durch Probandenstudien

Zur Evaluierung der Kompatibilität der Auslegung dient die Evaluierung der kooperativen Automation in Usability Untersuchungen im Simulator und im Versuchsfahrzeug. Kompatibles Verhalten der Automation bedeutet, dass ein Proband, der in einem vollautomatischen Modus von der Automation gefahren wird, sich im Fahrzeug wohlfühlt und nicht das Bedürfnis hat, eingreifen zu müssen. Auch in assistierten, teil- oder hochautomatisierten Modi lässt sich in Studien die Auslegung validieren und Verbesserungsmöglichkeiten hinsichtlich der Kompatibilität der Ziele, Werte und Methoden aufzeigen. Hier sind zusätzlich Fragen hinsichtlich der Nachvollziehbarkeit der Aktionen der Automation und der Kontrollierbarkeit von Interesse. Im Rahmen des iterativen Entwicklungsvorgehens fließen die Erkenntnisse in die weitere Entwicklung der Automation ein und bewirken so eine Verbesserung der Kompatibilität. Wird in einer Evaluierungsphase eine hinreichende Kompatibilität der entwickelten kompatiblen Ziele, Werte und Methoden festgestellt, so kann die Entwicklung für das betrachtete Anwendungsgebiet abgeschlossen werden. Als Ergebnis liegen ausgereifte kompatible Ziele, Werte und Methoden für das Anwendungsgebiet zusammen mit einer Umsetzung vor.

Die detaillierte kompatible Modellierung eines Manövers wird am Beispiel des Fahrstreifenwechsels in Kapitel 7 gezeigt.

4.5 Zusammenfassung des Kapitels

In diesem Kapitel wurde das in Kapitel 3 allgemein vorgestellte Konzept der kooperativen Automation technisch konkretisiert. Der Fokus lag dabei auf den Kooperation ausmachenden Elementen Kompatibilität, gemeinsame Handlungsplanung, gemeinsame Handlungsausführung und Kommunikation.

Um eine Grundlage für die Realisierung der gemeinsamen Handlungsplanung von Fahrer und kooperativer Automation zu schaffen, wurde zuerst das Valentalkonzept zur Bewertung von Handlungen vorgestellt. Die Ermöglichung der Kooperation zwischen Fahrer und Automation bei der gesamten gemeinsamen Bearbeitung der Fahraufgabe stand im Mittelpunkt der im Anschluss daran ausgearbeiteten funktionalen Systemarchitektur für die kooperative Automation. Für die in der funktionalen Systemarchitektur definierten Bearbeitungsebenen Manöverplanung, (Kurzzeit-) Trajektorienplanung und Steuerung / Regelung wurden des Weiteren Repräsentationen des Automationsverhaltens zur gemeinsamen Handlungsplanung und -ausführung dargestellt. Abschließend erfolgte die Beschreibung einer Vorgehensweise zur Entwicklung kompatibler Ziele, Werte und Methoden für die kooperative Automation.

Die wesentliche Neuheit der in diesem Kapitel vorgestellten Überlegungen ist die umfassende technische Konkretisierung des Konzeptes der kooperativen Automation für das teil- und hochautomatisierte Fahren mit dem zu Beginn umrissenen Fokus. Mit den konkreten Überlegungen dieses Kapitels sowie dem im vorigen Kapitel vorgestelltem allgemeinen Konzept der kooperativen Automation kann die erste zentrale Fragestellung dieser Arbeit „Wie kann ein Konzept für eine kooperative Automation für das teil- und hochautomatisierte Fahren technisch konkret aussehen, welches das Potential aufweist, die Probleme im Zusammenwirken von Mensch und Automation zu minimieren sowie einen Komfort- und Sicherheitsgewinn zu erreichen?“ weitgehend beantwortet werden. Die zur vollständigen Beantwortung der Fragestellung ausstehenden Evaluierungen der erhofften Wirkungen des Konzeptes hinsichtlich der Minimierung von Problemen im Zusammenwirken von Mensch und Automation und des Erreichens eines Komfort- und Sicherheitsgewinnes erfolgten im Rahmen des angewendeten iterativen Entwicklungsprozesses. In Kapitel 8 werden diese Evaluierungen dargestellt. Da durch die technische Konkretisierung die Grundlage für eine Umsetzung des Konzeptes gelegt wurde, kann im Weiteren die Beantwortung der zweiten zentralen Fragestellung dieser Arbeit „Welche Konzepte und Methoden eignen sich für die technische Umsetzung der kooperativen Automation für das teil- und hochautomatisierte Fahren?“ angegangen werden. Das folgende Kapitel 5 bietet einen Überblick der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten manöverbasierten Gesamtumsetzung der kooperativen Automation. Kapitel 6 geht detailliert auf die Umsetzung der Bearbeitungsebene Manöverplanung der kooperativen Automation ein.

Die folgende Tabelle 4.3 gibt abschließend eine Kurzzusammenfassung des vorliegenden Kapitels 4.

Inhalt des Kapitels
<ul style="list-style-type: none"> • Grundlage für die Realisierung der gemeinsamen Handlungsplanung: Valentalkonzept zur Bewertung von Handlungen • Funktionale Systemarchitektur für die kooperative Automation mit Fokus auf der Ermöglichung der Kooperation • Repräsentationen des Automationsverhaltens für Manöverplanung, (Kurzzeit-) Trajektorienplanung und Steuerung / Regelung • Vorgehensweise zur Entwicklung kompatibler Ziele, Werte und Methoden für die kooperative Automation
Beitrag zum Stand der Technik
<ul style="list-style-type: none"> • Umfassende technische Konkretisierung des Konzeptes der kooperativen Automation für das teil- und hochautomatisierte Fahren
Stand bezüglich der Fragestellungen der Arbeit
<p>Fragestellung 1: „Wie kann ein Konzept für eine kooperative Automation für das teil- und hochautomatisierte Fahren technisch konkret aussehen, welches das Potential aufweist, die Probleme im Zusammenwirken von Mensch und Automation zu minimieren sowie einen Komfort- und Sicherheitsgewinn zu erreichen?“</p> <p>Erreichter Stand hinsichtlich der Beantwortung der Fragestellung 1:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Durch technische Konkretisierung wird das in Kapitel 3 erarbeitete Konzept derart technisch konkret, dass die Fragestellung mit einer Evaluierung hinsichtlich der Wirkpotentiale vollständig beantwortet werden kann <p>Offen zur vollständigen Beantwortung der Fragestellung 1:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Evaluierung hinsichtlich der avisierten Wirkpotentiale → Kapitel 8
<p>Fragestellung 2: „Welche Konzepte und Methoden eignen sich für die technische Umsetzung der kooperativen Automation für das teil- und hochautomatisierte Fahren?“</p> <p>Erreichter Stand hinsichtlich der Beantwortung der Fragestellung 2:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Grundlage für eine Umsetzung des Konzeptes ist gelegt; die Beantwortung der Frage kann im Weiteren angegangen werden <p>Offen zur vollständigen Beantwortung der Fragestellung 2:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Erarbeitung der Konzepte und Methoden zur Umsetzung der kooperativen Automation → Kapitel 5, 6 und 7

Tabelle 4.3: Kurzzusammenfassung von Kapitel 4

5 Manöverbasierte Umsetzung der kooperativen Automation

In diesem Kapitel wird ein Ansatz zur manöverbasierten Umsetzung der kooperativen Automation für das teil- und hochautomatisierte Fahren vorgestellt. Der Ansatz fokussiert auf die Umsetzung der Kooperation ausmachenden Elemente Kompatibilität, gemeinsamer Aufbau des Situationsbewusstseins, gemeinsame Handlungsplanung, gemeinsame Handlungsausführung, Kommunikation sowie Rolle und Entscheidungsspielraum (siehe dazu Kapitel 3.2 und Tabelle C.1). Die Grundlage für die Überlegungen dieses Kapitels bildet die im vorigen Kapitel (Kapitel 4) erfolgte technische Konkretisierung des Konzeptes der kooperativen Automation.

Die Strukturierung der Umsetzung der kooperativen Automation basiert zum einen auf der in Kapitel 4.2 vorgestellten funktionalen Systemarchitektur. Zum anderen erfolgt eine Strukturierung der Umsetzung mit Hilfe von Manövern (zum Manöverbegriff siehe Definition 4.1). Aufbauend auf der funktionalen Systemarchitektur zeigt Abbildung 5.1 die Bearbeitungsstufen und -ebenen, deren Umsetzung der Gegenstand des vorliegenden Kapitels ist, sowie deren Zusammenwirken. Der manöverbasierte Ansatz findet Anwendung als vertikale Strukturierung der auf den drei Bearbeitungsebenen Manöverplanung, (Kurzzeit-) Trajektorienplanung und Steuerung / Regelung benötigten Fähigkeiten. Die Bearbeitungsebenen selbst bilden die horizontale Strukturierung der kooperativen Automation.

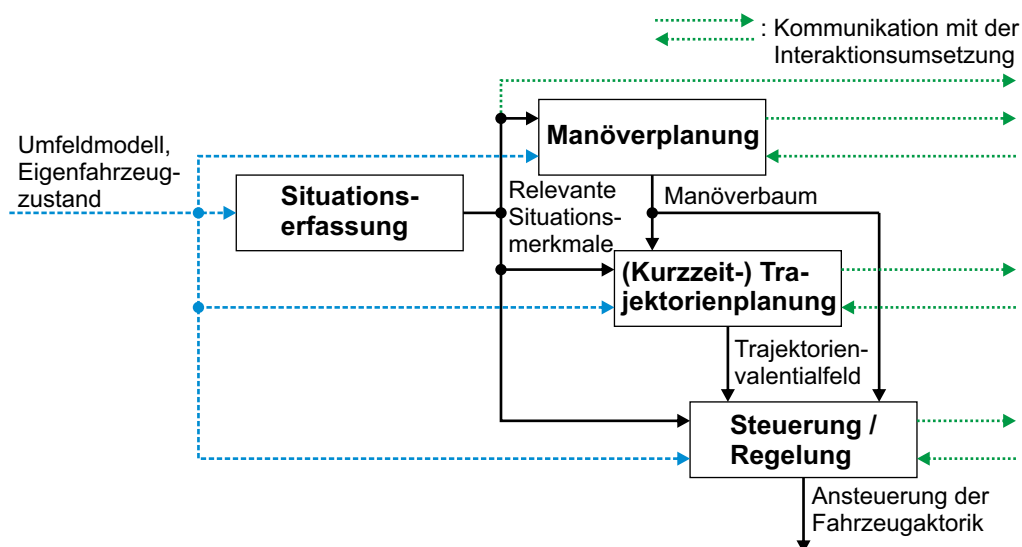


Abbildung 5.1: Bearbeitungsstufen und -ebenen der funktionalen Systemarchitektur für die kooperative Automation, deren Umsetzung Gegenstand von Kapitel 5 ist

Die Umsetzung des manöverbasierten Ansatzes wird objektorientiert konzipiert (einen Überblick über den objektorientierten Softwareentwurf geben zum Beispiel Lahres und Rayman [118]). Die objektorientierte Modellierung der Manöver steht dabei im Mittelpunkt des Softwareentwurfes. Kapitel 5.1 erläutert ausführlich diese Modellierung der Manöver. Die Einbettung der Manöver in den

weiteren objektorientierten Softwareentwurf wird in Kapitel 5.2 beleuchtet. Der unter Verwendung der Manöver, des weiteren objektorientierten Softwareentwurfes sowie der vier in Abbildung 5.1 dargestellten Bearbeitungsstufen und -ebenen zur Umsetzung der kooperativen Automation entworfene Softwareablauf wird abschließend in Kapitel 5.3 vorgestellt.

Neben der Umsetzung der Kooperation von Automation und Fahrer, die bei sämtlichen Betrachtungen dieses Kapitels im Vordergrund steht, ist es das Ziel, eine Umsetzung der kooperativen Automation zu konzipieren, die eine Autobahnfahrt vollständig abdecken kann (siehe dazu auch Kapitel 1.4).

5.1 Objektorientierte Modellierung der Manöver

Die objektorientierte Modellierung der Manöver zielt darauf ab, sämtliche von der kooperativen Automation benötigten Fähigkeiten hinsichtlich eines Manövers für die drei durch den manöverbasierten Ansatz adressierten Bearbeitungsebenen (Manöverplanung, (Kurzzeit-)Trajektorienplanung, Steuerung / Regelung) in einer Klasse zu modellieren. Eine derartige Klasse wird im Folgenden als Manöverklasse bezeichnet.

Die Basis der von der kooperativen Automation benötigten Fähigkeiten hinsichtlich eines Manövers wird durch diejenigen gebildet, die für die Realisierung des teil- und hochautomatisierten Fahrens generell benötigt werden. Aufgrund der Umsetzung der Kooperation ausmachenden Elemente müssen bei der Ausgestaltung dieser Fähigkeiten jedoch besondere Merkmale eingearbeitet werden. Des Weiteren sind besondere Fähigkeiten notwendig, die ausschließlich der Umsetzung Kooperation ausmachender Elemente dienen. Die hinsichtlich der generellen Realisierung des teil- und hochautomatisierten Fahrens benötigten Fähigkeiten beinhalten die Feststellung der Durchführbarkeit des Manövers, die Bereitstellung einer Entscheidungsgrundlage für die Manöverauswahl, die Planung einer konkreten Ausführung und die Umsetzung der geplanten Ausführung. Die für die Umsetzung der Kooperation ausmachenden Elemente gemeinsame Handlungsplanung und gemeinsame Handlungsausführung zusätzlich erforderlichen Fähigkeiten sind die Erkennung des Manövers, die Beschreibung einer konkreten Ausführung, die Ermöglichung der weitreichenden gemeinsamen Anpassung einer geplanten Ausführung, die Unterbrechung und jederzeitige Fortführung der Ausführung sowie der Umgang mit Interventionen des Fahrers in die ausgeführte Handlung. Des Weiteren ist die Fähigkeit der Berücksichtigung des Entscheidungsspielraumes der Automation notwendig. Bei der Umsetzung sämtlicher Fähigkeiten muss das Kooperation ausmachende Element Kompatibilität besonders berücksichtigt werden. Für die Beschreibung des angewendeten Vorgehens zur Erreichung von Kompatibilität wird auf Kapitel 4.4 verwiesen. Der durch die Fähigkeiten abzudeckende Verhaltens- und Situationsumfang für ein Manöver ist unter Berücksichtigung der Kompatibilität zum Fahrer durch die Definition des Manöverbegriffs bestimmt (siehe Definition 4.1). Eine Abstimmung eines Manöverplanes im Rahmen der gemeinsamen Handlungsplanung wird durch eine derartige kompatible Basis erst ermöglicht. Ebenso wird dadurch gewährleistet, dass es für den Fahrer erkennbar ist, welches Manöver von der Automation ausgeführt wird.

Im Rahmen des objektorientierten Softwareentwurfes bietet eine Klasse die Möglichkeit, durch Definition von Attributen und Operationen die geforderten Fähigkeiten zu modellieren. Die Attribute dienen der Vorhaltung von Informationen. Durch eine Operation wird eine Funktionalität zur Ver-

fügung gestellt. Zur Verwendung in einem laufenden Softwaresystem können dann Objekte dieser Klassen instanziiert werden. In der Umsetzung der kooperativen Automation werden die Instanzen der Manöverklassen als Manöverobjekte bezeichnet. Auf diese Manöverobjekte können die drei Bearbeitungsebenen zugreifen und so die modellierten Attribute und Operationen verwenden. Somit können die hinsichtlich der Manöver modellierten Fähigkeiten von der kooperativen Automation angewendet werden.

Abbildung 5.2 zeigt die für die Modellierung entworfene Klassenhierarchie der Manöverklassen. Zur Notation dieses sowie der folgenden in dieser Arbeit dargestellten Klassendiagramme wird die UML Version 2.0 (Unified Modelling Language) verwendet (für eine Einführung in die UML 2.0 siehe zum Beispiel Oestereich [157]). In der abstrakten Oberklasse „Manöver“ ist der Rahmen der Modellierung festgelegt. Um die einzelnen Manöver mit den von der kooperativen Automation benötigten Fähigkeiten hinsichtlich dieser Manöver zu modellieren, werden einzelne Manöverklassen als Spezialisierung der abstrakten Oberklasse „Manöver“ angelegt. In jeder dieser spezialisierten Manöverklassen erfolgt die vollständige Modellierung eines Manövers. In Abbildung 5.2 sind exemplarisch die spezialisierten Manöverklassen für die Manöver „Stillstehen“, „Fahrstreifen folgen“ und „Fahrzeug folgen“ gezeigt. Durch das Anlegen der Manöverklassen als Spezialisierungen der abstrakten Oberklasse kann eine standardisierte Modellierung aller Manöver gewährleistet werden. Die Zugriffe auf die instanziierten Manöverobjekte innerhalb der drei Bearbeitungsebenen können somit allgemeingültig und damit unabhängig von konkreten Manövern erfolgen.

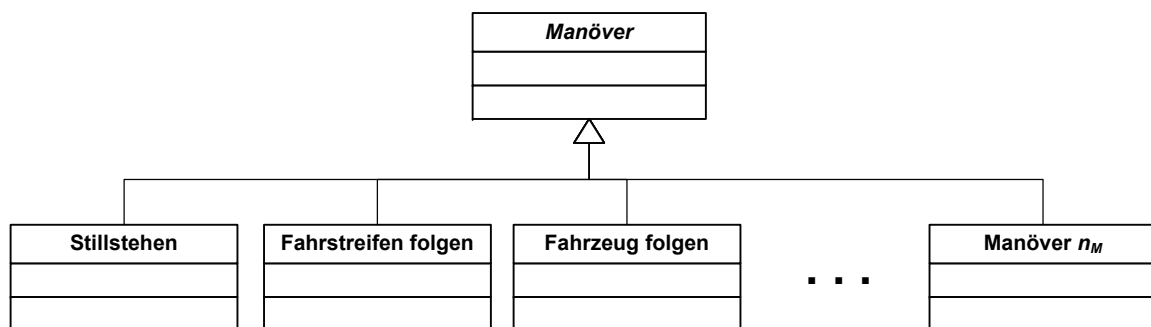


Abbildung 5.2: Klassenhierarchie der Manöverklassen

Im Weiteren wird die objektorientierte Modellierung der Manöver anhand der Attribute (siehe Kapitel 5.1.1) und Operationen (siehe Kapitel 5.1.2) der Manöverklassen vorgestellt. Abschließend erfolgt in Kapitel 5.1.3 die Darstellung der Definition konkreter kompatibler Manöver für die Autobahnfahrt.

5.1.1 Attribute der Manöverklassen

Durch die Attribute der Manöverklassen werden die Daten modelliert, die bei der Umsetzung der hinsichtlich eines Manövers benötigten Fähigkeiten Verwendung finden. Die einzelnen Attribute adressieren die gesamte Modellierung auf den drei betrachteten Bearbeitungsebenen der kooperativen Automation (Manöverplanung, (Kurzzeit-) Trajektorienplanung und Steuerung / Regelung). Tabelle 5.1 zeigt eine Übersicht dieser Attribute, die im Weiteren erläutert werden.

Beschreibung	Kurzzeichen	Adressierte Bearbeitungsebenen des Modellierungselements
Manöverbegriff	B	Manöverplanung
Ausprägung	α	Manöverplanung
Anlass	a	Manöverplanung
Intensität des Anlasses	a_I	Manöverplanung
Phase	p	Manöverplanung
Initiativwert	i	Manöverplanung
Durchführbarkeit	d	Manöverplanung
Relativer Wert	w_{rel}	Manöverplanung
Valential	v	Manöverplanung
Wahrscheinlichkeit aktuell gefahrenes Manöver	$w_{aktuell}$	Manöverplanung
Beschreibungsparameter	P_B	Manöverplanung, (Kurzzeit-) Trajektorienplanung
Fahrstilparameter der Automation	$P_{F, Automation}^m$	Manöverplanung, (Kurzzeit-) Trajektorienplanung, Steuerung / Regelung
Fahrstilparameter der Interaktionsumsetzung	$P_{F, Interaktion}^m$	Manöverplanung, (Kurzzeit-) Trajektorienplanung, Steuerung / Regelung
Verbindung zur Trajektorie	Θ_{\rightarrow}	(Kurzzeit-) Trajektorienplanung
Verbindung zum Stellaktionspunkt	Γ_{\rightarrow}	Steuerung / Regelung
Bezeichner	b	Manöverplanung, (Kurzzeit-) Trajektorienplanung, Steuerung / Regelung

Tabelle 5.1: Attribute der Manöverklassen

Die zu Beginn in Tabelle 5.1 aufgeführten Attribute adressieren die Modellierung auf der Bearbeitungsebene Manöverplanung. Der Manöverbegriff ist die nach Definition 4.1 definierte begriffliche Beschreibung des Manövers, das durch die Manöverklasse modelliert wird.

Die Attribute Ausprägung, Anlass, Intensität des Anlasses und Phase dienen der detaillierteren begrifflichen Beschreibung des Manövers. Die Definition der möglichen Ausprägungen, Anlässe und Phasen für ein bestimmtes Manöver erfolgt in dessen spezialisierter Manöverklasse.

Die Ausprägung des Manövers beschreibt begrifflich eine Präzisierung der durch das Manöver beschriebenen Bewegungen im Kontext der Umgebung. Diese Präzisierung bleibt dabei auf der abstrakten Ebene der Manöverplanung. Das Manöver „Fahrstreifen wechseln“ wird zum Beispiel durch die Ausprägungen „nach links“ oder „nach rechts“ begrifflich präzisiert.

Der Anlass für ein Manöver liefert eine Begründung für die Ausführung des Manövers in der betrachteten Situation. Bei einem Fahrstreifenwechsel sind zum Beispiel die Anlässe „Überholen“ und „Fahrstreifenwahl“ möglich. Die Intensität des Anlasses ($a_I \in [0, 1]$) beschreibt die Stärke des Dranges, das Manöver aufgrund dieses Anlasses auszuführen.

Zur Strukturierung des Ablaufes können Manöver in verschiedene Phasen eingeteilt werden. Diese Phasen zeichnen sich durch voneinander im Verlauf des Manövers unterscheidbare Bewegungen im Kontext der Umgebung aus, die in ihrer Gesamtheit das Manöver ausmachen. Bei einem Fahrstreifenwechsel lässt sich beispielsweise eine Start- und Endphase bestimmen. Die Startphase dauert zum Beispiel bis zum Überschreiten der Fahrstreifenbegrenzung an, die Endphase bezieht sich auf die sich anschließende Bewegung zur Mitte des Zielfahrstreifens.

Die durch die Attribute Ausprägung, Anlass, Intensität des Anlasses und Phase detaillierte begriffliche Beschreibung eines geplanten Manövers bietet für die gemeinsame Handlungsplanung mit dem Fahrer die Möglichkeit, den Planungsgegenstand genauer zu beschreiben. Daher ist bei der konkreten Modellierung dieser Attribute für ein Manöver die Kompatibilität der möglichen Ausprägungen, Anlässe und Phasen zu einem Fahrer von größter Bedeutung.

Der Initiativwert i wird zur Modellierung des Entscheidungsspielraumes der kooperativen Automation bei der gemeinsamen Handlungsplanung verwendet. Der boolesche Wert i zeigt an, ob das Manöver auf alleinige Initiative der Automation von ihr direkt ausgeführt werden darf (siehe Kapitel 6.2).

Die Attribute d , w_{rel} , v und $w_{aktuell}$ werden bei der Manöverplanung bestimmt. Die Durchführbarkeit, der relative Wert und das Valential dienen der gemeinsamen Handlungsplanung (siehe Kapitel 4.1 und Kapitel 6.1). Die Wahrscheinlichkeit, mit der das Manöver als aktuell gefahrenes infrage kommt, wird für die Manövererkennung verwendet (siehe Kapitel 6.1). Eine Anwendung der Manövererkennung ist die Umsetzung der impliziten Kommunikation mit dem Fahrer für die gemeinsame Handlungsplanung (siehe Kapitel 6.3).

Durch die Beschreibungsparameter werden die für die Ausführung des Manövers relevanten Inhalte der Situation spezifiziert sowie die für die Ausführung relevanten Parameter der Situation beschrieben. Die Menge der Beschreibungsparameter wird in Abhängigkeit der Relevanz für jedes Manöver in dessen spezialisierter Manöverklasse festgelegt. Die Spezifizierung der relevanten Inhalte der Situation wird zur Modellierung auf der Bearbeitungsebene Manöverplanung verwendet. Bei dem Manöver „Fahrzeug folgen“ ist dieses zum Beispiel die Information, welchem Fahrzeug gefolgt wird. Die Beschreibung relevanter Parameter der Situation erfolgt auf der Bearbeitungsebene (Kurzzeit-) Trajektorienplanung. Bei dem Manöver „Fahrzeug folgen“ ist ein derartiger Parameter zum Beispiel die Zeitlücke, die zu dem zu folgenden Fahrzeug aktuell vorliegt.

Die Attribute Fahrstilparameter der Automation $P_{F, Automation}^m$ und Fahrstilparameter der Interaktionsumsetzung $P_{F, Interaktion}^m$ werden zur Modellierung auf sämtlichen Bearbeitungsebenen verwendet. Für die Manöverplanung bieten sie die Möglichkeit zur Parametrierung von Manöverentscheidungen. Bei der Trajektorienplanung und Steuerung / Regelung dienen sie zur Parametrierung der Manöverausführungen. Durch die gezielte Wahl der Werte der Fahrstilparameter lassen sich zum Beispiel ein sportlicher oder ein komfortabler Fahrstil erzeugen. Die Menge der Fahrstilparameter wird spezifisch für jedes Manöver in dessen spezialisierter Manöverklasse festgelegt.

Für die Umsetzung der gemeinsamen Handlungsplanung sind in den Fahrstilparametern der Automation $P_{F, Automation}^m$ die von der Automation präferierten Werte der Parameter sowie aus Sicht der Automation minimal und maximal zulässige Werte vorhanden. Die präferierten Werte werden von der Automation zur Parametrierung der Manöverentscheidungen und der Ausführung des Manövers genutzt, wenn keine Kommunikation mit dem Fahrer hinsichtlich der Fahrstilparameter erfolgt ist.

Erfolgt mittels der Interaktionsumsetzung eine explizite Kommunikation mit dem Fahrer hinsichtlich der gemeinsamen Planung der Fahrstilparameter, bieten die minimal und maximal zulässigen Werte der Automation den Verhandlungsrahmen. Die präferierten Werte bilden das Verhandlungsziel der Automation. Als Ergebnis der Verhandlung werden die durch die Interaktionsumsetzung ermittelten Fahrstilparameter des Fahrers $P_{F,Interaktion}^m$ gesetzt. Liegen die Werte der Parameter im aus Sicht der Automation zulässigen Wertebereich, so können die Fahrstilparameter $P_{F,Interaktion}^m$ zur Parametrierung der Manöverentscheidungen und der Manöverausführung verwendet werden.

Die Fahrstilparameter sind ein zentrales Element der Modellierung um die Kenntnisse hinsichtlich eines zum Fahrer kompatiblen Automationsverhaltens umzusetzen (siehe dazu Kapitel 4.4). Um eine explizite Modellierung von Kenntnissen bezüglich kompatiblen Verhaltens zu ermöglichen, werden solche Fahrstilparameter gewählt, die im Kontext des Manövers eine explizite Bedeutung haben. Für das Manöver „Fahrzeug folgen“ ist zum Beispiel die Zeitlücke, mit der dem Vorderfahrzeug gefolgt werden soll, ein solcher Parameter. Die für die Umsetzung der hinsichtlich eines Manövers benötigten Fähigkeiten zu entwickelnde Funktionalität muss in der Lage sein, diese Fahrstilparameter zu nutzen um damit einen kompatiblen Fahrstil zu erzeugen. Die Kompatibilität der Fahrstilparameter ist darüber hinaus auch für die Umsetzung der gemeinsamen Handlungsplanung hinsichtlich der Fahrstilparameter von entscheidender Bedeutung. Eine explizite Kommunikation bezüglich der Fahrstilparameter kann nur erfolgen, wenn Kompatibilität vorliegt und der Parametrierungsspielraum somit für den Fahrer verständlich ist.

Zur Beschreibung eines Manövers auf der Bearbeitungsebene (Kurzzeit-) Trajektorienplanung dient die Trajektorie (siehe Kapitel 4.3). Die Trajektorien werden nicht in den instanziierten Manöverobjekten, sondern im Trajektorienvallentiafeld vorgehalten (siehe Kapitel 4.3). Die Verbindung zur Trajektorie Θ_{\rightarrow} ermöglicht den Zugriff auf die Trajektorie des Manöverobjektes. Analog zu dieser Verbindung stellt Γ_{\rightarrow} die Verbindung zum Stellaktionspunkt her, der auf der Bearbeitungsebene Steuerung / Regelung zur Modellierung des Verhaltens verwendet wird (siehe Kapitel 4.3). Die Stellaktionspunkte der Manöver werden ebenfalls nicht im Manöverobjekt gespeichert, sondern im Stellaktionsvallentiafeld (siehe Kapitel 4.3).

Abschließend wird durch das Attribut Bezeichner b die Möglichkeit einer eindeutigen Bezeichnung eines instanziierten Manöverobjektes gegeben. Dadurch wird die Wiedererkennbarkeit eines bestimmten instanziierten Manöverobjektes in der Umsetzung der kooperativen Automation gewährleistet.

Mittels der modellierten Attribute der Manöverklassen wird eine vollständige Repräsentation der Fähigkeiten der kooperativen Automation hinsichtlich der Manöver geboten. Durch die Nutzung der Manöverobjekte ergibt sich für die Interaktionsumsetzung die Möglichkeit, bei der Kommunikation mit dem Fahrer hinsichtlich eines Manövers jederzeit auf die gerade am besten geeigneten Attribute zurückzugreifen. Somit bieten sich zum Beispiel vielfältige Möglichkeiten zur Ausgestaltung der Umsetzung der gemeinsamen Handlungsplanung mit dem Fahrer.

5.1.2 Operationen der Manöverklassen

Durch die Operationen der Manöverklassen werden die Funktionalitäten zur Umsetzung der hinsichtlich eines Manövers benötigten Fähigkeiten modelliert. Die einzelnen Operationen müssen in

den spezialisierten Manöverklassen für das jeweilige Manöver definiert werden. Tabelle 5.2 gibt einen Überblick der Operationen, die im Folgenden vorgestellt werden.

Operation	Rückgabewert	Verwendung auf Bearbeitungsebenen
<i>Erzeuge durchführbare Manöver</i>	Manövermenge M	Manöverplanung
<i>Erzeuge wahrscheinlich aktuell gefahrene Manöver</i>	Manövermenge M	Manöverplanung
<i>Bestimme Anlass</i>	-	Manöverplanung
<i>Bestimme Ähnlichkeit</i>	Ähnlichkeit s	Manöverplanung
<i>Bestimme Beschreibungsparameter</i>	-	Manöverplanung, (Kurzzeit-) Trajektorienplanung
<i>Aktualisiere Fahrstilparameter Automation</i>	-	Manöverplanung, (Kurzzeit-) Trajektorienplanung, Steuerung / Regelung
<i>Aktualisiere Fahrstilparameter Interaktion</i>	-	Manöverplanung, (Kurzzeit-) Trajektorienplanung, Steuerung / Regelung
<i>Berechne Trajektorie</i>	Trajektorie Θ	(Kurzzeit-) Trajektorienplanung
<i>Berechne Stellaktionspunkt</i>	Stellaktionspunkt Γ	Steuerung / Regelung

Tabelle 5.2: Operationen der Manöverklassen

Die zuerst in Tabelle 5.2 aufgeführten Operationen werden auf der Bearbeitungsebene Manöverplanung verwendet. Die Operation *Erzeuge durchführbare Manöver* erzeugt eine Menge von Manöverobjekten der jeweiligen spezialisierten Manöverklasse, die in der betrachteten Situation durchführbar sind. Da diese auf den tieferen Bearbeitungsebenen zur weiteren Handlungsgenerierung für das Manöver verwendet werden, erfolgt so durch die Operation *Erzeuge durchführbare Manöver* die Steuerung der Handlungsgenerierung für das Manöver. Durch die ständige Bestimmung der Durchführbarkeiten stellt die Operation fest, ob es für die Automation möglich ist eine Manöverausführung zu beginnen oder im Verlauf einer Manöverausführung diese fortzusetzen und ob demzufolge die weitere Handlungsgenerierung durchgeführt werden kann. Bei der Bestimmung der Durchführbarkeiten werden die Fahrstilparameter $P_{F, Automation}^m$ und $P_{F, Interaktion}^m$ zur Umsetzung des Fahrstils verwendet. Die von der Operationen *Erzeuge durchführbare Manöver* erzeugten Manöverobjekte verfügen über eine detaillierte begriffliche Beschreibung des Manövers. Dazu wird den folgenden Attributen ein Wert zugewiesen: $B, \alpha, a, a_I, p, i, P_B, P_{F, Automation}^m, P_{F, Interaktion}^m, b, d$. Die in der Operation eingesetzten Algorithmen werden detaillierter in Kapitel 6.1 beschrieben, dabei werden auch gezielt die spezifischen Anforderungen bezüglich der Umsetzung der Kooperation ausmachenden Elemente adressiert.

Die Operation *Erzeuge wahrscheinlich aktuell gefahrene Manöver* erzeugt eine Menge von Manöverobjekten der spezialisierten Manöverklasse, deren Wahrscheinlichkeit, dass sie aktuell vom Fahrzeug gefahren werden, größer ist als ein bestimmter Schwellwert. Die erzeugten Manöverobjekte verfügen über eine detaillierte begriffliche Beschreibung des Manövers. Dazu sind die folgenden

Attribute mit einem Wert belegt: $B, \alpha, a, a_I, p, i, P_B, P_{F, Automation}^m, P_{F, Interaktion}^m, b, w_{aktuell}$. Die in der Operation eingesetzten Algorithmen werden detailliert in Kapitel 6.1 beschrieben.

Die Operation *Bestimme Anlass* bietet die Möglichkeit der Bestimmung des Anlasses a sowie der Intensität des Anlasses a_I und wird von den beiden zuvor erläuterten Operationen verwendet.

Um feststellen zu können, ob zwei Manöver ähnlich oder sogar gleich sind, wird die in der Operation *Bestimme Ähnlichkeit* definierte Ähnlichkeitsfunktion $f_{\text{ähnlich}}$ verwendet. Zur Berechnung der Ähnlichkeit s ($s \in [0, 1]$) werden die in den beiden Manöverobjekten vorhandenen Manöverbegriffe B , Ausprägungen α , Phasen p sowie Beschreibungsparameter P_B genutzt. Dies ermöglicht zum Beispiel Manöverobjekte aus zwei Mengen zu vergleichen, um zu ermitteln, ob ein bestimmtes Manöverobjekt in beiden Mengen vorhanden ist.

Mittels der Operation *Bestimme Beschreibungsparameter* lassen sich die in einer bestimmten Manöverklasse enthaltenen Beschreibungsparameter P_B berechnen. Diese Operation wird sowohl auf der Bearbeitungsebene Manöverplanung als auch auf der Bearbeitungsebene (Kurzzeit-) Trajektorienplanung verwendet, um die für die jeweilige Bearbeitungsebene modellierten Beschreibungsparameter zu bestimmen.

Die in Tabelle 5.2 aufgeführten Operationen zum Aktualisieren der Fahrstilparameter (*Aktualisiere Fahrstilparameter Automation*, *Aktualisiere Fahrstilparameter Interaktion*) werden auf sämtlichen Bearbeitungsebenen eingesetzt. Die Operationen bedienen sich dazu allgemeiner Mengen der Fahrstilparameter der Automation sowie der Interaktion. Sie beschaffen sich aus den dort vorhandenen Parametern diejenigen, die für die Fahrstilparameter $P_{F, Automation}^m$ und $P_{F, Interaktion}^m$ des spezifischen Manövers benötigt werden.

Die Operation *Berechne Trajektorie* sorgt für die Erzeugung oder Aktualisierung der Trajektorie für die Ausführung des Manövers. Die Operation wird auf der Bearbeitungsebene (Kurzzeit-) Trajektorienplanung verwendet. Die berechnete Trajektorie ist auf das Manöver begrenzt. Für die Trajektorienplanung benötigte Parameter werden den Attributen des Manöverobjektes entnommen. Zur Umsetzung des Fahrstils werden $P_{F, Automation}^m$ und $P_{F, Interaktion}^m$ verwendet. Als Ergebnis gibt diese Operation die Trajektorie für die Ausführung des Manövers zurück, die im Trajektorienvalentialfeld abgelegt wird. Außerdem setzt sie im Manöverobjekt die Verbindung zu dieser berechneten Trajektorie Θ_{\rightarrow} . Liegt noch keine Trajektorie für dieses Manöverobjekt vor, wird eine neue Trajektorie erzeugt, anderenfalls wird die bestehende Trajektorie aktualisiert. Die Anforderungen, die sich aufgrund der Umsetzung der Kooperation ausmachenden Elemente an die Trajektorienplanungsalgorithmen ergeben, werden detaillierter am Beispiel des Manövers „Fahrstreifen wechseln“ in Kapitel 7.4 betrachtet.

Mittels der Operation *Berechne Stellaktionspunkt* erfolgt die Erfüllung der Steuerungs- / Regelungsaufgabe für das Manöver. Dazu wird der Stellaktionspunkt zur Ausführung des Manövers erzeugt oder aktualisiert, im Stellaktionsvalentialfeld abgelegt sowie die im Manöverobjekt vorhandene Verbindung zu diesem Stellaktionspunkt Γ_{\rightarrow} gesetzt. Für die Berechnung wird der Operation die mit dem Manöverobjekt verbundene Trajektorie zur Verfügung gestellt. Benötigte Parameter werden aus den Attributen des Manöverobjektes entnommen. Zur Umsetzung des Fahrstils werden $P_{F, Automation}^m$ und $P_{F, Interaktion}^m$ verwendet. Es können in den letzten Regelzyklen berechnete Größen berücksichtigt werden, die im Manöverobjekt gespeichert sind. Besonders zu berücksichtigende Anforderungen an die eingesetzten Algorithmen aufgrund der Umsetzung der Kooperation

ausmachenden Elemente sind die Kompatibilität der generierten Verläufe des Stellaktionspunktes sowie der Umgang mit Interventionen des Fahrers in die ausgeführte Handlung.

5.1.3 Definition kompatibler Manöver für die Autobahnfahrt

Nachdem in den vorigen Abschnitten die generelle Modellierung der Manöver vorgestellt wurde, wird im folgenden Abschnitt auf die Definition konkreter kompatibler Manöver eingegangen. Im Rahmen der Definition wird sowohl die Einteilung als auch die Ausprägung der Manöver adressiert. Für die Modellierung eines Manövers wird jeweils eine spezialisierte Manöverklasse angelegt.

Erste Überlegungen zur Definition kompatibler Manöver wurden vom Autor dieser Arbeit bereits kurz in [127] vorgestellt. Der vorliegende Abschnitt basiert auf diesen Überlegungen.

Um eine zum Fahrer kompatible Definition der einzelnen konkreten Manöver zu erreichen, werden aus der Literatur bekannte Ergebnisse aus Analysen des Fahrverhaltens von Fahrern zugrunde gelegt. Neben den dort verwendeten Definitionen von Manövern bildet die Gruppierung von gleichartigem Fahrverhalten von Fahrern im Kontext der Umgebung die Grundlage. Unter Nutzung von Definition 4.1, durch die der Manöverbegriff als begriffliche Beschreibung von gleichartigen Fahrzeugbewegungen im Kontext der Umgebung des Fahrzeuges definiert wird, erfolgt aufbauend auf den Ergebnissen aus Analysen des Fahrverhaltens von Fahrern die Erstellung der Definitionen der einzelnen konkreten Manöver.

Der von den zu definierenden Manövern insgesamt umfasste Verhaltens- und Situationsumfang soll es ermöglichen, unter Nutzung der kooperativen Automation eine vollständige Autobahnfahrt vom Auffahren auf die Autobahn bis hin zum Abfahren von der Autobahn vorzunehmen (siehe Kapitel 1.4). Daher sind vorwiegend Ergebnisse von Analysen des Fahrverhaltens von Fahrern auf Autobahnen oder autobahnähnlichen Straßen von Interesse. Bei der Definition der Manöver wurden unter anderem die im folgenden aufgeführten Arbeiten zugrunde gelegt, die das umrissene Themenfeld adressieren: Ahmed [5], Brackstone et al. [26], Daamen et al. [41], Ehmanns [54, 55], Fancher et al. [59], Fastenmeier et al. [60, 61], Filzek [62], Kondyli et al. [113], Ludmann et al. [130], Sandkühler [172], de Waard et al. [43], van Winsum et al. [200], Wiedemann [206], Zheng et al. [215].

Um eine möglichst vollständige Betrachtung der erforderlichen Verhaltensweisen und zu bewältigenden Situationen für eine Autobahnfahrt zu erreichen, wird der durch den Manöverkatalog von Nagel (zum Beispiel [145], siehe auch Kapitel 2.2.2) umfasste Verhaltens- und Situationsumfang bei der Entwicklung als Maßstab angewendet. Der durch den von Nagel definierten Manöverkatalog umfasste Verhaltens- und Situationsumfang deckt die gesamte Bandbreite von Autobahn- bis hin zu Stadtszenarien ab. Nagel gibt an, dass der Manöverkatalog ausreicht, um Fahrten im Rahmen dieser Szenarien ohne Notfallmanöver vollständig nachzubilden [145]. Bei der Entwicklung der Manöver für die kooperative Automation sind aufgrund der Zielsetzung ausschließlich die für Autobahnszenarien relevanten Manöver von Nagel von Interesse. Dieses sind im Einzelnen: Anfahren, Straßenzug folgen, Fahrstreifenwechsel links/rechts, Annähern an Gegenstand vor dem Fahrzeug, Überholen, vor Gegenstand anhalten, links/rechts an Gegenstand vorbeifahren, hinter anfahrendem Fahrzeug anfahren, Fahrzeug folgen.

Im Folgenden werden zunächst die auf Basis der Ergebnisse der Analysen des Fahrverhaltens von Fahrern definierten Manöver vorgestellt. Abbildung 5.3 gibt eine Übersicht dieser Manöver. Ab-

schließlich erfolgt die Überprüfung des so definierten Verhaltens- und Situationsumfanges anhand des Verhaltens- und Situationsumfanges, der durch den von Nagel definierten Manöverkatalog umfasst wird.

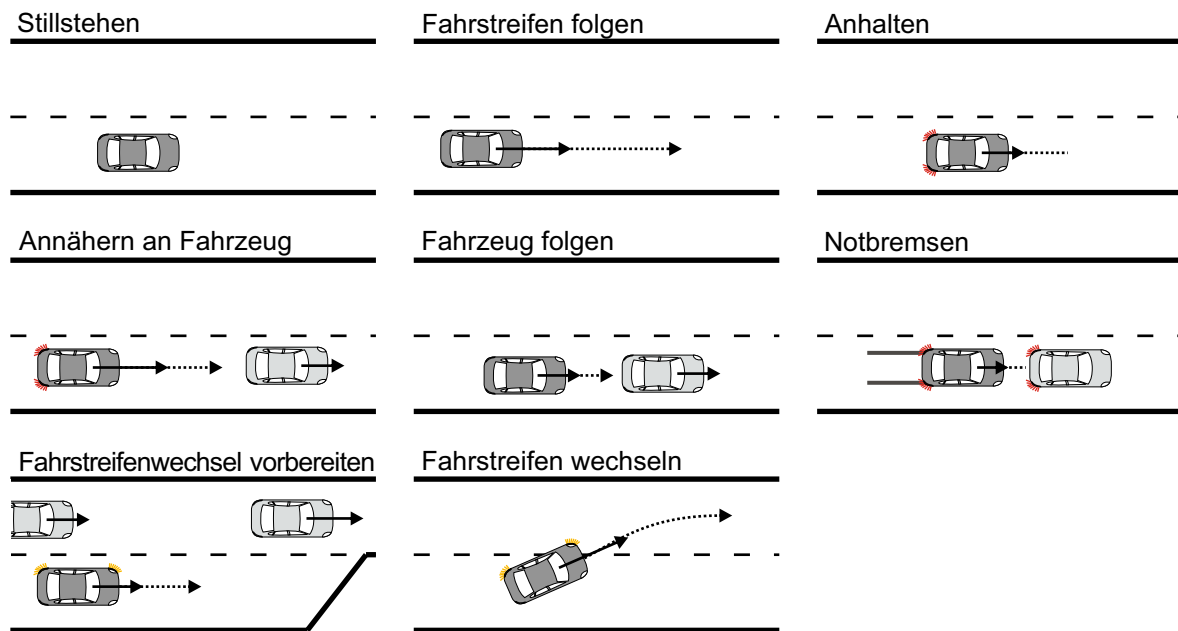


Abbildung 5.3: Für das Autobahnszenario modellierte Manöver der kooperativen Automation

Das Manöver „Stillstehen“ umfasst das Verharren des Eigenfahrzeuges im Stillstand. Es ist für die kooperative Automation durchführbar, wenn das Eigenfahrzeug bereits steht.

Im Manöver „Fahrstreifen folgen“ folgt das Eigenfahrzeug dem Fahrstreifen, auf dem es sich aktuell befindet. Der Verhaltensumfang beinhaltet neben einer auf die Fahrstreifenmitte abzielenden Querführung eine situationsangepasste Geschwindigkeitswahl. Die Wahl der Geschwindigkeit basiert unter anderem auf dem Krümmungsverlauf des Fahrstreifens sowie Geschwindigkeitsbegrenzungen. Die Durchführung des Manövers ist möglich, wenn sich das Eigenfahrzeug auf einem Fahrstreifen befindet und keine Beeinflussung durch ein sich vor diesem befindendes Fahrzeug vorliegt.

Im Rahmen des Manövers „Anhalten“ erfolgt ein komfortables Abbremsen des Eigenfahrzeuges bis zum Stillstand. Währenddessen wird dem Fahrstreifen weiter gefolgt, auf dem es sich aktuell befindet. Das Manöver ist durchführbar, wenn das Eigenfahrzeug einem Fahrstreifen folgt.

Das Manöver „Annähern an Fahrzeug“ umfasst den Annäherungsvorgang an ein dem Eigenfahrzeug auf dem gleichen Fahrstreifen vorausfahrendes oder vor dem Eigenfahrzeug stehendes Fahrzeug unter Beibehaltung des aktuellen Fahrstreifens. Während des Manövers folgt das Eigenfahrzeug weiterhin dem Fahrstreifen und verringert seine Geschwindigkeit mit dem Ziel, dem vorausfahrenden Fahrzeug in einem konstanten Abstand zu folgen. Befindet sich das vor dem Eigenfahrzeug befindende Fahrzeug im Stillstand, so hält das Eigenfahrzeug in einem komfortablen Abstand hinter diesem Fahrzeug an. Die Durchführung des Manövers ist möglich, wenn eine Beeinflussung des Eigenfahrzeuges durch ein vorausfahrendes Fahrzeug mit geringerer Geschwindigkeit vorliegt. Im Manöver „Fahrzeug folgen“ folgt das Eigenfahrzeug einem auf dem gleichen Fahrstreifen vorausfahrenden Fahrzeug in einem konstanten Abstand unter Beibehaltung des aktuellen Fahrstreifens. Hält das vorausfahrende Fahrzeug an, so hält das Eigenfahrzeug ebenfalls in einem komforta-

blen Abstand hinter diesem Fahrzeug an. Das Manöver ist durchführbar, wenn sich ein vorausfahrendes Fahrzeug in einem derartigen konstanten Abstand vor dem Eigenfahrzeug befindet, so dass eine Beeinflussung vorliegt.

Durch das Manöver „Notbremsen“ wird eine Bremsung mit maximal möglicher Bremsbeschleunigung modelliert, die eine schnellstmögliche Erreichung des Stillstandes zum Ziel hat. Die Durchführung des Manövers ist möglich, wenn sich das Eigenfahrzeug nicht im Stillstand befindet. Für das Manöver modellierte Anlässe sind unter anderem die Gefahr einer Kollision mit einem vorausfahrenden Fahrzeug sowie die Gefahr des Fahrbahnverlassens.

Das Manöver „Fahrstreifenwechsel vorbereiten“ hat das Ziel, eine Situation herbeizuführen, in der die Durchführung eines Fahrstreifenwechsels möglich ist. In der Ausgangssituation des Manövers ist ein Fahrstreifenwechsel potentiell beabsichtigt oder notwendig, jedoch nicht durchführbar. Das Eigenfahrzeug folgt innerhalb des Manövers weiterhin dem aktuellen Fahrstreifen unter Berücksichtigung eines eventuell vorausfahrenden Fahrzeuges und fährt auf die Höhe einer für den Fahrstreifenwechsel geeigneten Lücke auf. Ein Beispiel für die Anwendung des Manövers ist das Einfädeln auf die Autobahn.

Das Manöver „Fahrstreifen wechseln“ umfasst die Bewegung des Eigenfahrzeuges von einem Startfahrstreifen zu einem unmittelbar benachbarten Zielfahrstreifen. Zu Beginn folgt das Eigenfahrzeug dem Startfahrstreifen. Das Manöver ist abgeschlossen, wenn es dem Zielfahrstreifen folgt. Während der Manöverdurchführung werden unter anderem vorausfahrende Fahrzeuge, die Fahrstreifengeometrien und Geschwindigkeitsbegrenzungen beachtet. Der durch das Manöver umfasste Situationsumfang reicht von unkritischen Fahrstreifenwechselsituationen bis hin zu Notausweichsituationen. Das Manöver ist durchführbar, wenn sich auf dem Zielfahrstreifen neben dem Eigenfahrzeug eine hinreichend große Lücke befindet. Die detaillierte Modellierung des Manövers „Fahrstreifen wechseln“ wird in Kapitel 7 beschrieben.

Die Überprüfung des durch die definierten Manöver umfassten Verhaltens- und Situationsumfanges anhand des durch den von Nagel definierten Manöverkatalog umfassten Verhaltens- und Situationsumfanges ergibt das in Tabelle 5.3 detailliert gezeigte Ergebnis. Dieses detaillierte Ergebnis lässt sich dazu zusammenfassen, dass der durch die definierten Manöver umfasste Verhaltens- und Situationsumfang den durch den von Nagel definierten Manöverkatalog umfassten Verhaltens- und Situationsumfang vollständig abdeckt. Darüber hinaus werden durch die definierten Manöver weitere Verhaltensweisen sowie Situationen abgedeckt. Dieses sind im Einzelnen Notfallmanöver (zum Beispiel das Manöver „Notbremsen“) sowie das Manöver „Anhalten“, welches zum Beispiel bei einem Anhalten auf dem Standstreifen Verwendung findet. Des Weiteren bildet das Manöver „Fahrstreifenwechsel vorbereiten“ eine notwendige Erweiterung, um zum Beispiel ein gezieltes Einfädeln auf die Autobahn zu ermöglichen.

Manöver nach Nagel	Verhaltens- und Situationsumfang abgedeckt durch
Anfahren	wird durch das Manöver „Fahrstreifen folgen“ abgedeckt
Straßenzug folgen	Manöver „Fahrstreifen folgen“
Fahrstreifenwechsel links/rechts	Manöver „Fahrstreifen wechseln“
Annähern an Gegenstand vor dem Fahrzeug	Manöver „Annähern an Fahrzeug“
Überholen	zusammengesetzt aus den Manövern „Fahrstreifen wechseln“ auf den Überholfahrstreifen, „Fahrstreifen folgen“ auf dem Überholfahrstreifen und „Fahrstreifen wechseln“ zurück auf den Ausgangsfahrstreifen
vor Gegenstand anhalten	Manöver „Annähern an Fahrzeug“ umfasst Anhalten bis in den Stillstand
links/rechts an Gegenstand vorbeifahren	Manöver „Fahrstreifen folgen“ auf dem Überholfahrstreifen führt zu einem Vorbeifahren
hinter anfahrendem Fahrzeug anfahren	wird durch das Manöver „Fahrzeug folgen“ abgedeckt
Fahrzeug folgen	Manöver „Fahrzeug folgen“

Tabelle 5.3: Überprüfung des durch die definierten Manöver umfassten Verhaltens- und Situationsumfanges anhand des durch den von Nagel definierten Manöverkatalog umfassten Verhaltens- und Situationsumfanges

5.2 Einbettung der Manöver in den weiteren objektorientierten Softwareentwurf

Die Manöverklassen bilden das zentrale Element des objektorientierten Softwareentwurfes für die Umsetzung der kooperativen Automation. Die Komplettierung des Entwurfes erfolgt durch die in diesem Abschnitt vorgestellten Klassen. Abbildung 5.4 zeigt die modellierten Klassen gemeinsam mit der abstrakten Oberklasse „Manöver“ sowie deren Beziehungen. Die spezialisierten Manöverklassen sind aus Gründen der Übersichtlichkeit im Diagramm nicht dargestellt. Die einzelnen modellierten Klassen werden im Weiteren kurz erläutert. Das Zusammenspiel dieser Klassen und der enthaltenen Operationen für die Umsetzung der kooperativen Automation wird in Kapitel 5.3 dargelegt.

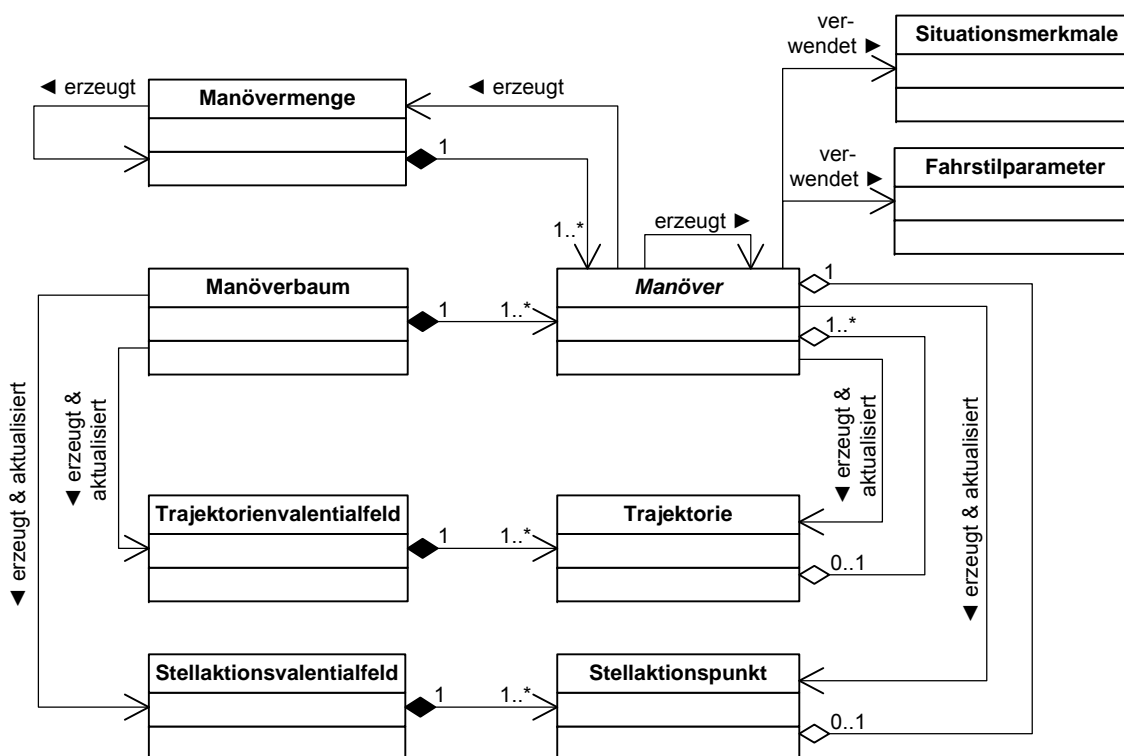


Abbildung 5.4: Einbettung der Manöverklassen in den weiteren objektorientierten Softwareentwurf

Relevante Situationsmerkmale

Die Klasse Situationsmerkmale (siehe Abbildung 5.4) dient der Modellierung der relevanten Situationsmerkmale, die als Erweiterung des Umfeldmodells eine Interpretation der Situation im Kontext der Fahrzeugführungsaufgabe bieten. Die Bearbeitungsstufe Situationserfassung ist zuständig für deren Bestimmung (siehe Kapitel 4.2.2). Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden in dieser Klasse relevante Situationsmerkmale für das Autobahnszenario definiert.

Um diese relevanten Situationsmerkmale zu definieren, werden zunächst die relevanten Situationsmerkmalsobjekte für das Autobahnszenario ausgewählt. Abbildung 5.5 zeigt die ausgesuchten relevanten Situationsmerkmalsobjekte für das Autobahnszenario. Diese umfassen die sich in der direkten Umgebung des Eigenfahrzeuges befindlichen Objekte (zur Definition der Bezeichnungen

siehe Tabelle 5.4). Diese Objekte sind das Eigenfahrzeug sowie die Fahrzeuge und Fahrstreifen in der direkten Umgebung des Eigenfahrzeuges. Die Beschreibung der Fahrstreifen und der Fahrzeuge erfolgt relativ zum Eigenfahrzeug. Dadurch wird erreicht, dass die Beschreibung aus Sicht des Fahrers erfolgt und somit unter diesem Aspekt Kompatibilität zum Fahrer vorliegt.

Der aktuelle Fahrstreifen ist der Fahrstreifen, auf dem sich das Eigenfahrzeug momentan befindet. Die übrigen Fahrstreifen werden relativ zu diesem bezeichnet. Die Fahrzeuge werden zunächst den einzelnen Fahrstreifen zugeordnet. Ein Fahrzeug wird als seitliches Fahrzeug bezeichnet, wenn seine longitudinale Ausdehnung in den Bereich der longitudinalen Ausdehnung des Eigenfahrzeuges reicht. Befinden sich mehrere Fahrzeuge im seitlichen Bereich, so werden diese zu einem einzigen Situationsmerkmalsobjekt zusammengefasst. Die übrigen Fahrzeuge werden vor oder hinter dem Eigenfahrzeug eingeordnet. Dabei werden nur die Fahrzeuge berücksichtigt, die sich jeweils longitudinal am nächsten zum Eigenfahrzeug befinden. Die übrigen Fahrzeuge werden vernachlässigt, da diese nicht direkt relevant für die Fahrzeugführungsaufgabe in der aktuellen Situation sind.

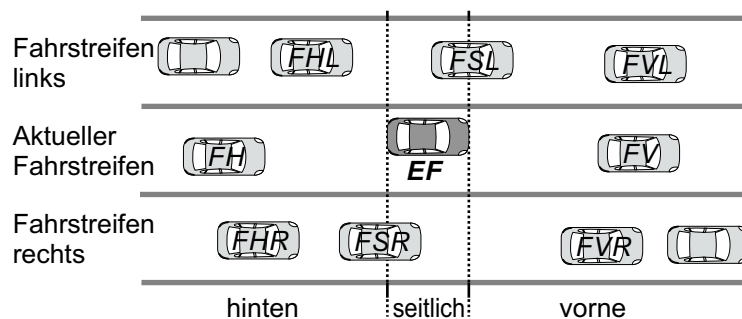


Abbildung 5.5: Relevante Situationsmerkmalsobjekte für das Autobahnszenario (zur Definition der Bezeichnungen siehe Tabelle 5.4)

Situationsmerkmalsobjekt	Kurzzeichen
Gesamtheit der Situationsmerkmale	<i>SM</i>
Fahrstreifen links	<i>STL</i>
Aktueller Fahrstreifen	<i>STA</i>
Fahrstreifen rechts	<i>STR</i>
Fahrzeug vorne links	<i>FVL</i>
Fahrzeug vorne	<i>FV</i>
Fahrzeug vorne rechts	<i>FVR</i>
Fahrzeug seitlich links	<i>FSL</i>
Fahrzeug seitlich rechts	<i>FSR</i>
Fahrzeug hinten links	<i>FHL</i>
Fahrzeug hinten	<i>FH</i>
Fahrzeug hinten rechts	<i>FHR</i>
Eigenfahrzeug	<i>EF</i>

Tabelle 5.4: Bezeichnungen der relevanten Situationsmerkmalsobjekte für das Autobahnszenario

Die einzelnen bezüglich der Fahrstreifen und Fahrzeuge relevanten Situationsmerkmale werden ebenfalls unter Berücksichtigung der Kompatibilität ausgesucht. Tabelle 5.5 listet ausgewählte Situationsmerkmale für die Fahrstreifen und die Fahrzeuge auf den Fahrstreifen auf.

Situationsmerkmal eines Fahrstreifens	Kurzzeichen
Existenz des Fahrstreifens	\exists
Laterale Abweichung der Eigenfahrzeugmitte von der Fahrstreifenmitte	Δy_F
Gierwinkelabweichung von der Tangente an den Fahrstreifen	$\Delta \psi_F$
Zeit bis zum Überschreiten der Fahrstreifenbegrenzung (Time to Line Crossing)	t_{LC}
Zeit seit letztem Aufenthalt auf dem Fahrstreifen	$t_{\text{letzter_Aufenthalt}}$
Distanz bis zum Ende des Fahrstreifens	Δs_{Ende}
Geschwindigkeitsbegrenzung	v_{limit}
Typ des Fahrstreifens	c_F
Typ der linken Fahrstreifenmarkierung	c_{FMl}
Typ der rechten Fahrstreifenmarkierung	c_{FMr}
Situationsmerkmal eines Fahrzeuges	Kurzzeichen
Existenz des Fahrzeuges	\exists
Longitudinale Distanz	Δs
Zeitlücke	t_{HW}
Time to Collision	t_{TC}
Longitudinale Relativgeschwindigkeit bezüglich der Eigenfahrzeuggeschwindigkeit	Δv_{EF}
Lateraler Abstand der seitlichen Fahrzeugkante zur Fahrstreifenmarkierung auf der zum Eigenfahrzeug zugewandten Seite	$\Delta y_{S,FM}$

Tabelle 5.5: Ausgewählte relevante Situationsmerkmale für das Autobahnszenario

Fahrstilparameter

In der Klasse Fahrstilparameter (siehe Abbildung 5.4) werden die allgemeinen Mengen der Fahrstilparameter definiert. Mittels der Fahrstilparameter können Manöverentscheidungen und die Ausführung von Manövern so parametrisiert werden, dass zum Beispiel ein sportlicher oder ein komfortabler Fahrstil resultiert. Um einen konsistenten Fahrstil innerhalb sämtlicher Manöver zu erreichen, entnehmen die in den spezialisierten Manöverklassen modellierten Fahrstilparameter (siehe Kapitel 5.1.1) ihre Werte aus den hier definierten allgemeinen Mengen der Fahrstilparameter. Die allgemeinen Fahrstilparameter bilden damit die zentrale Stelle im System, um Parameter zur Realisierung eines bestimmten Fahrstils einzustellen.

In der Klasse Fahrstilparameter erfolgen die Definitionen der allgemeinen Menge der Fahrstilparameter der Automation $P_{F, \text{Automation}}^{\text{allgemein}}$ und der allgemeinen Menge der von der Interaktionsumsetzung ermittelten Fahrstilparameter des Fahrers $P_{F, \text{Interaktion}}^{\text{allgemein}}$. Für die Umsetzung der gemeinsamen Handlungsplanung sind in den Fahrstilparametern der Automation $P_{F, \text{Automation}}^{\text{allgemein}}$ die von der Automation

präferierten Werte der Parameter sowie aus Sicht der Automation minimal und maximal zulässige Werte vorhanden (siehe Tabelle 5.6). Die präferierten Werte werden von der Automation zur Parametrierung der Ausführung des Manövers genutzt, wenn keine Kommunikation mit dem Fahrer hinsichtlich der Fahrstilparameter erfolgt ist. Erfolgt mittels der Interaktionsumsetzung eine explizite Kommunikation mit dem Fahrer hinsichtlich der gemeinsamen Planung der Fahrstilparameter, bieten die minimal und maximal zulässigen Werte der Automation den Verhandlungsrahmen. Die präferierten Werte bilden das Verhandlungsziel der Automation. Als Ergebnis der Verhandlung werden die durch die Interaktionsumsetzung ermittelten Fahrstilparameter des Fahrers $P_{F,Interaktion}^{allgemein}$ gesetzt (siehe Tabelle 5.7). Liegen die Werte der Parameter im aus Sicht der Automation zulässigen Wertebereich, so können die Fahrstilparameter $P_{F,Interaktion}^{allgemein}$ zur Umsetzung des Fahrstils verwendet werden. Analog zu den manöverspezifischen Fahrstilparametern gilt auch bei den allgemeinen Mengen der Fahrstilparameter die Kompatibilitätsforderung (zur Erreichung der Kompatibilität siehe Kapitel 4.4).

Fahrstilparameter der Automation	Kurzzeichen
Präferierte Zielgeschwindigkeit	$v_{Ziel,pref}$
Maximale Zielgeschwindigkeit	$v_{Ziel,max}$
Maximale Überschreitung der Geschwindigkeitsbegrenzung	$\Delta v_{limit,max}$
Präferierter lateraler Versatz des Eigenfahrzeuges im Fahrstreifen	Δy_{pref}
Maximaler lateraler Versatz des Eigenfahrzeuges im Fahrstreifen	Δy_{max}
Minimaler lateraler Versatz des Eigenfahrzeuges im Fahrstreifen	Δy_{min}
Präferierte Zeitlücke zum vorausfahrenden Fahrzeug	$t_{HW,pref}$
Minimale Zeitlücke zum vorausfahrenden Fahrzeug	$t_{HW,min}$
Minimaler Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug	$d_{FV,min}$
Maximale positive Querbeschleunigung	$a_{y,max+}$
Präferierte positive Querbeschleunigung	$a_{y,pref+}$
Präferierte negative Querbeschleunigung	$a_{y,pref-}$
Maximale negative Querbeschleunigung	$a_{y,max-}$
Maximale positive Längsbeschleunigung	$a_{x,max+}$
Präferierte positive Längsbeschleunigung	$a_{x,pref+}$
Präferierte negative Längsbeschleunigung	$a_{x,pref-}$
Maximale negative Längsbeschleunigung	$a_{x,max-}$

Tabelle 5.6: Ausgewählte Fahrstilparameter der Automation aus $P_{F,Automation}^{allgemein}$ für das Autobahnszenario

Manövermenge

Die Klasse Manövermenge (siehe Abbildung 5.4) enthält eine Menge von Manöverobjekten zur Verarbeitung auf der Bearbeitungsebene Manöverplanung. Sie stellt Operationen für die Nutzung der Fähigkeiten der enthaltenen Manöverobjekte zur Verfügung (siehe Tabelle 5.8). Die Operation *Erzeuge wahrscheinlich aktuell gefahrenes Manöver* bedient sich der Operation *Erzeuge wahr-*

Fahrstilparameter der Interaktionsumsetzung	Kurzzeichen
Präferierte Zielgeschwindigkeit	$v_{Ziel,pref}$
Präferierter lateraler Versatz des Eigenfahrzeuges im Fahrstreifen	Δy_{pref}
Präferierte Zeitlücke zum vorausfahrenden Fahrzeug	$t_{HW,pref}$
Präferierte positive Querb beschleunigung	$a_{y,pref+}$
Präferierte negative Querb beschleunigung	$a_{y,pref-}$
Präferierte positive Längsb beschleunigung	$a_{x,pref+}$
Präferierte negative Längsb beschleunigung	$a_{x,pref-}$

Tabelle 5.7: Ausgewählte Fahrstilparameter der Interaktionsumsetzung aus $P_{F,Interaktion}^{allgemein}$ für das Autobahnszenario

scheinlich aktuell gefahrene Manöver der enthaltenen Manöverobjekte. Ihr Rückgabewert bildet ein Manöverobjekt, welches das am wahrscheinlichsten gefahrene Manöver des Fahrzeuges beschreibt. Durch die Operation *Erzeuge Menge der durchführbaren Manöver* wird eine Manövermenge erzeugt, die die Zusammenführung der durch Anwendung der Operationen *Erzeuge durchführbare Manöver* der einzelnen enthaltenen Manöverobjekte entstandenen Manövermengen ist.

Die Operation *Berechne Valentiale* ermittelt für die enthaltenen Manöverobjekte das als Grundlage der gemeinsamen Handlungsplanung dienende Valentiale v (zum Valentiale siehe Kapitel 4.1). Als Zwischenergebnis wird zusätzlich der relative Wert w_{rel} für jedes Manöverobjekt bestimmt. Zur Umsetzung des Fahrstils gehen die Fahrstilparameter $P_{F,Automation}^m$ und $P_{F,Interaktion}^m$ in die Berechnungen ein. Kapitel 6.1.3 beschreibt den für diese Berechnungen entwickelten Algorithmus.

Operation	Rückgabewert	Verwendung auf Bearbeitungsebene
<i>Erzeuge wahrscheinlich aktuell gefahrenes Manöver</i>	Manöverobjekt	Manöverplanung
<i>Erzeuge durchführbare Manöver</i>	Manövermenge	Manöverplanung
<i>Berechne Valentiale</i>	-	Manöverplanung
<i>Aktualisiere Fahrstilparameter</i>	-	Manöverplanung

Tabelle 5.8: Wichtige Operationen der Manövermenge

Die Operation *Aktualisiere Fahrstilparameter* aktualisiert aufgrund der allgemeinen Mengen der Fahrstilparameter ($P_{F,Automation}^{allgemein}$, $P_{F,Interaktion}^{allgemein}$) die manöverspezifischen Mengen der Fahrstilparameter der einzelnen in der Manövermenge enthaltenen Manöverobjekte ($P_{F,Automation}^m$, $P_{F,Interaktion}^m$). Es werden dazu die Operationen *Aktualisiere Fahrstilparameter Automation* und *Aktualisiere Fahrstilparameter Interaktion* der Manöverobjekte eingesetzt.

Repräsentationen des Automationsverhaltens für die Kooperation mit dem Fahrer

Die Klassen Manöverbaum, Trajektorie, Trajektorienvalentialfeld, Stellaktionspunkt und Stellaktionsvalentialfeld (siehe Abbildung 5.4) modellieren die in Kapitel 4.3 beschriebenen Repräsentationen des Automationsverhaltens für die Kooperation mit dem Fahrer. Der Manöverbaum (siehe

Kapitel 4.3.1) enthält Manöverobjekte und stellt damit das Ergebnis der Bearbeitungsebene Manöverplanung dar. Die Ausgabe der Bearbeitungsebene (Kurzzeit-) Trajektorienplanung ist das Trajektorienvalentialfeld, welches die geplanten Trajektorien beinhaltet (siehe Kapitel 4.3.2). Das Stellaktionsvalentialfeld besteht aus den Stellaktionspunkten, die auf der Bearbeitungsebene Steuerung / Regelung berechnet werden (siehe Kapitel 4.3.3).

Der auf der Bearbeitungsebene Manöverplanung aufgebaute Manöverbaum bietet für die übrigen Bearbeitungsebenen den Zugang zur Nutzung der Fähigkeiten der enthaltenen Manöverobjekte. Dazu werden die in Tabelle 5.9 dargestellten Operationen definiert, die im Folgenden kurz erklärt werden.

Operation	Rückgabewert	Verwendung auf Bearbeitungsebenen
<i>Setze Baum zusammen</i>	-	Manöverplanung
<i>Berücksichtige Entscheidungsraum</i>	-	Manöverplanung
<i>Ermögliche gemeinsame Manöverplanung mittels impliziter Kommunikation</i>	-	Manöverplanung
<i>Ermögliche gemeinsame Manöverplanung mittels expliziter Kommunikation</i>	-	Manöverplanung
<i>Berechne Trajektorienvalentialfeld</i>	Trajektorienvalentialfeld	(Kurzzeit-) Trajektorienplanung
<i>Berechne Stellaktionsvalentialfeld</i>	Stellaktionsvalentialfeld	Steuerung / Regelung
<i>Aktualisiere Fahrstilparameter</i>	-	(Kurzzeit-) Trajektorienplanung, Steuerung / Regelung

Tabelle 5.9: Wichtige Operationen des Manöverbaumes

Die auf der Bearbeitungsebene Manöverplanung verwendeten Operationen dienen dem Aufbau des Manöverbaumes sowie der gemeinsamen Handlungsplanung. Sie werden detailliert in Kapitel 6 erklärt. Die Operation *Setze Baum zusammen* setzt einen Manöverbaum aus in Manövermengen vorliegenden Manöverobjekten zusammen und gewährleistet darüber hinaus durch die Einbeziehung des im letzten Zyklus aufgebauten Manöverbaumes die Kontinuität in der Manöverplanung. Die Operation *Berücksichtige Entscheidungsraum* legt unter Berücksichtigung des Initiativwertes i das ausgeführte Manöver der Automation fest. Um die gemeinsame Handlungsplanung auf der Bearbeitungsebene Manöverplanung umzusetzen, werden die Operationen *Ermögliche gemeinsame Manöverplanung mittels impliziter Kommunikation* und *Ermögliche gemeinsame Manöverplanung mittels expliziter Kommunikation* verwendet.

Zur Aktualisierung des Trajektorienvalentialfeldes auf der Bearbeitungsebene (Kurzzeit-) Trajektorienplanung dient die Operation *Berechne Trajektorienvalentialfeld*. Diese Operation verwendet die jeweilige Operation *Berechne Trajektorie* der im Manöverbaum enthaltenen Manöverobjekte. Um eine Trajektorie vollständig bis zum Planungshorizont aufzubauen, werden diese Operationen der Manöverobjekte einer Manöverfolge (zur Manöverfolge siehe Kapitel 4.3.1) solange angewendet, bis der Planungshorizont erreicht ist. Die zurückgegebenen Trajektorien werden dann zu einer

Trajektorie für jede Manöverfolge zusammengesetzt. Bei der Erzeugung der Trajektorien werden in den Manöverobjekten der jeweiligen Manöverfolgen die Verknüpfungen zu den zugehörigen Trajektorien gesetzt. Umgekehrt werden in den Trajektorien die Verknüpfungen zu den zugehörigen Manöverobjekten hergestellt. Die den einzelnen Manöverfolgen zugehörigen Trajektorien bilden dann gemeinsam das Trajektorienvalentialfeld.

Um das Stellaktionsvalentialfeld auf der Bearbeitungsebene Steuerung / Regelung zu aktualisieren, wird die Operation *Berechne Stellaktionsvalentialfeld* verwendet. In jedem Manöverobjekt eines aktuell durchführbaren Manövers im Manöverbaum (siehe Kapitel 4.3.1) wird dazu die dort vorhandene Operation *Berechne Stellaktionspunkt* angewendet. Durch die im Manöverobjekt vorhandene Verknüpfung zur im Trajektorienvalentialfeld enthaltenen Trajektorie liegt diese den Steuerungs- und Regelungsalgorithmen vor. Die jeweiligen Operationen *Berechne Stellaktionspunkt* können so auf die Trajektorien zugreifen und Stellaktionspunkte zurückgeben. Im Manöverobjekt wird eine Verknüpfung zum Stellaktionspunkt gesetzt, im Stellaktionspunkt erfolgt das Setzen der umgekehrten Verknüpfung. Das Stellaktionsvalentialfeld wird durch diese Stellaktionspunkte gebildet.

Die Operation *Aktualisiere Fahrstilparameter* aktualisiert mittels der allgemeinen Mengen der Fahrstilparameter ($P_{F, Automation}^{allgemein}$, $P_{F, Interaktion}^{allgemein}$) die manöverspezifischen Mengen der Fahrstilparameter der einzelnen im Manöverbaum enthaltenen Manöverobjekte ($P_{F, Automation}^m$, $P_{F, Interaktion}^m$). Es werden dazu die Operationen *Aktualisiere Fahrstilparameter Automation* und *Aktualisiere Fahrstilparameter Interaktion* der Manöverobjekte eingesetzt.

5.3 Softwareablauf der manöverbasierten Umsetzung der kooperativen Automation

Nachdem in den vorigen Abschnitten dieses Kapitels die Kernkomponenten des objektorientierten Softwareentwurfes vorgestellt wurden, erfolgt in diesem Abschnitt die Darstellung des zur Umsetzung der kooperativen Automation entworfenen Softwareablaufes. Dieser wird durch das Zusammenspiel der vorgestellten Klassen in der Bearbeitungsstufe Situationserfassung sowie auf den Bearbeitungsebenen Manöverplanung, (Kurzzeit-) Trajektorienplanung und Steuerung / Regelung realisiert. Die Manöverklassen und die daraus instanziierten Manöverobjekte nehmen dabei zusammen mit dem Manöverbaum eine zentrale Stellung ein. Anhand des in Abbildung 5.6 gegebenen Überblicks wird im Weiteren der Ablauf der manöverbasierten Umsetzung der kooperativen Automation erläutert. Die einzelnen beschriebenen Abläufe in den Bearbeitungsstufen und -ebenen werden zyklisch wiederholt, so dass sich eine ständige Aktualisierung der jeweiligen Ausgangswerte ergibt.

Bearbeitungsstufe Situationserfassung

Die Bearbeitungsstufe Situationserfassung (siehe Abbildung 5.6) berechnet auf der Grundlage des Umfeldmodells und des Eigenfahrzeugzustandes die relevanten Situationsmerkmale. Zum gemeinsamen Aufbau des Situationsbewusstseins mit dem Fahrer werden die relevanten Situationsmerkmale der Interaktionsumsetzung zur Verfügung gestellt. Darüber hinaus nutzen die drei Bearbeitungsebenen die relevanten Situationsmerkmale als Eingang.

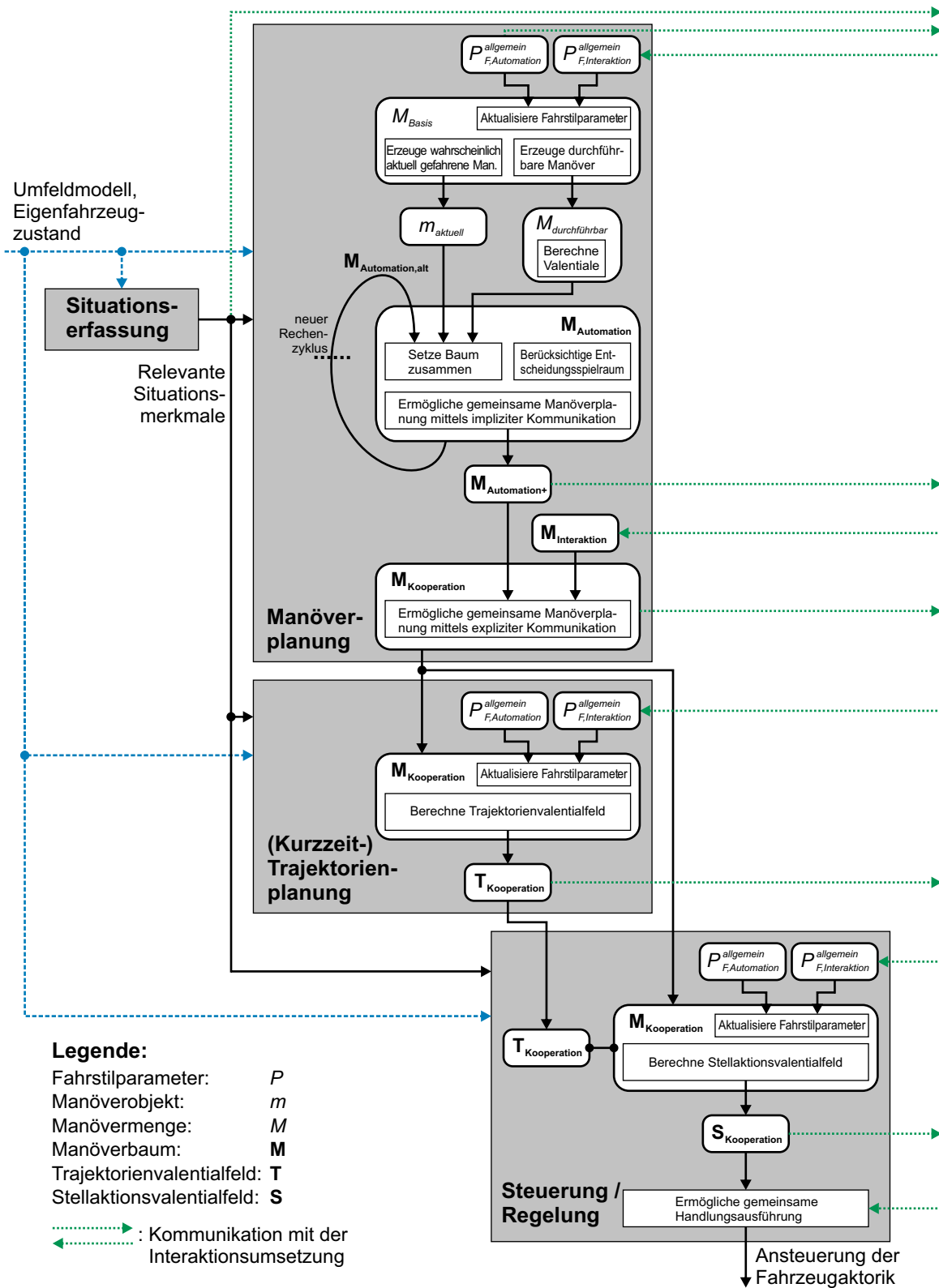


Abbildung 5.6: Übersicht des Softwareablaufes der manöverbasierten Umsetzung der kooperativen Automation

Bearbeitungsebene Manöverplanung

Die Bearbeitungsebene Manöverplanung (siehe Abbildung 5.6) bedient sich zur Erfüllung ihrer Aufgabe der Manöverbasismenge M_{Basis} . Durch die Manöverbasismenge sind die für das System

verfügbaren Manöver zur Laufzeit definiert. Dazu ist in der Manöverbasismenge jeweils ein instanziiertes Manöverobjekt jeder Manöverklasse vorhanden ($m_{Basis,1}, \dots, m_{Basis,n_M}$). Die in der Manöverbasismenge enthaltenen Basismanöverobjekte beziehen sich nicht auf eine konkrete Ausführung des Manövers, sondern sie beschreiben das Manöver im Allgemeinen. Von den vorhandenen Attributen sind daher neben dem Manöverbegriff B und dem Bezeichner b nur diejenigen mit Werten belegt, die zur Umsetzung des Fahrstils, der gemeinsamen Handlungsplanung und des Entscheidungsspielraumes vorgesehen sind ($P_{F, Automation}^m, P_{F, Interaktion}^m, i$). Zu Beginn der Ausführung der kooperativen Automation werden die Basismanöverobjekte erzeugt. Während des Betriebs können Manöverobjekte aus der Manöverbasismenge entfernt oder ihr hinzugefügt werden, um dadurch den umfassten Verhaltens- und Situationsumfang der kooperativen Automation zu verändern.

Für den Aufbau des Manöverbaumes benötigt die Manöverplanung Informationen über das aktuell vom Fahrzeug gefahrene Manöver sowie die in den betrachteten Situationen durchführbaren Manöver. Um diese Informationen zu erhalten, werden die von der Manöverbasismenge M_{Basis} bereitgestellten Operationen *Erzeuge wahrscheinlich aktuell gefahrenes Manöver* und *Erzeuge durchführbare Manöver* (siehe Tabelle 5.8) angewendet.

Als Ergebnis liegen der Manöverplanung das Manöverobjekt $m_{aktuell}$ und die Manövermenge $M_{durchführbar}$ vor. $m_{aktuell}$ und die in $M_{durchführbar}$ enthaltenen Manöverobjekte sind von den Basismanöverobjekten neu instanziierte Objekte. Die neuen Manöverobjekte beschreiben konkrete Manöverausführungen auf der begrifflichen Abstraktionsebene der Manöverplanung. Dazu sind die folgenden Attribute in den Manöverobjekten mit Werten belegt: $B, \alpha, a, a_I, p, i, P_B, P_{F, Automation}^m, P_{F, Interaktion}^m, b$. Die Attribute $P_{F, Automation}^m, P_{F, Interaktion}^m, i$ werden vom jeweiligen Basismanöverobjekt übernommen. Das Manöverobjekt $m_{aktuell}$ verfügt darüber hinaus über einen Wert für $w_{aktuell}$, die in $M_{durchführbar}$ enthaltenen Manöverobjekte über einen Wert für d . Für die einzelnen in $M_{durchführbar}$ enthaltenen Manöverobjekte erfolgt mittels der Operation *Berechne Valentiale* die Bestimmung des Valentiales v .

Nachfolgend kann der Manöverbaum $\mathbf{M}_{Automation}$ unter Verwendung der Operation *Setze Baum zusammen* des Manöverbaumes mit dem Manöverobjekt $m_{aktuell}$ und den in $M_{durchführbar}$ enthaltenen Manöverobjekten zusammengesetzt werden. Neben dem Zusammensetzen des im aktuellen Rechenzyklus neu erstellten Manöverbaumes $\mathbf{M}_{Automation}$ ist es die Aufgabe der Operation *Setze Baum zusammen* die Kontinuität in der Handlungsplanung zu gewährleisten. Dazu wird $\mathbf{M}_{Automation}$ mit dem im letzten Rechenzyklus aufgebauten Manöverbaum $\mathbf{M}_{Automation,alt}$ zusammengeführt. Die bei der Manöverplanung zum Aufbau des Manöverbaumes angewendeten Algorithmen werden ausführlich in Kapitel 6.1 beschrieben.

Durch die Anwendung der Operation *Berücksichtige Entscheidungsspielraum* wird unter Berücksichtigung des Entscheidungsspielraumes das Manöver bestimmt, das die Automation beabsichtigt auszuführen (siehe Kapitel 4.3.1) und im Manöverbaum $\mathbf{M}_{Automation}$ markiert. Die Beschreibung der Vorgehensweise zur Berücksichtigung des Entscheidungsspielraumes erfolgt in Kapitel 6.2.

Für die Umsetzung der gemeinsamen Manöverplanung mit dem Fahrer wird sowohl die Möglichkeit der impliziten als auch die der expliziten Kommunikation geboten (zu impliziter und expliziter Kommunikation siehe Kapitel 3.2.6). Zuerst erfolgt auf der Basis des Manöverbaumes $\mathbf{M}_{Automation}$ die Ermöglichung der gemeinsamen Manöverplanung mittels impliziter Kommunikation. Da der Fahrer das aktuell gefahrene Manöver des Fahrzeuges $m_{aktuell}$ aufgrund der gemeinsamen Hand-

lungsausführung beeinflussen kann, ergibt sich die Möglichkeit aufgrund dieses Manövers den in $\mathbf{M}_{\text{Automation}}$ beschriebenen Manöverplan anzupassen und damit die implizite Kommunikation zur Manöverplanung anzuwenden. Kapitel 6.3 beschreibt die dazu in der Operation *Ermögliche gemeinsame Manöverplanung mittels impliziter Kommunikation* umgesetzte Vorgehensweise. Als Ergebnis liegt $\mathbf{M}_{\text{Automation}+}$ vor, in dem der gegebenenfalls angepasste Manöverplan dargestellt ist.

Für die gemeinsame Manöverplanung mittels expliziter Kommunikation mit dem Fahrer wird der Interaktionsumsetzung der Manöverbaum $\mathbf{M}_{\text{Automation}+}$ zur Verfügung gestellt. Die Interaktionsumsetzung kann auf dieser Basis die explizite Kommunikation mit dem Fahrer für die gemeinsame Manöverplanung in Form einer Verhandlung gestalten. Der Manöverbaum $\mathbf{M}_{\text{Interaktion}}$ wird von der Interaktionsumsetzung als Ergebnis dieser Verhandlung mit dem Fahrer übermittelt. Auf der Grundlage der Manöverbäume $\mathbf{M}_{\text{Interaktion}}$ und $\mathbf{M}_{\text{Automation}+}$ wird mittels der Operation *Ermögliche gemeinsame Manöverplanung mittels expliziter Kommunikation* der Baum $\mathbf{M}_{\text{Kooperation}}$ erstellt. Dieser bildet das Ergebnis der gemeinsamen Manöverplanung von Fahrer und Automation. Das in $\mathbf{M}_{\text{Kooperation}}$ als ausgeführt markierte Manöver wird im Weiteren von der Automation zur Ausführung gebracht. Die Realisierung der gemeinsamen Handlungsplanung auf der Bearbeitungsebene der Manöverplanung mittels expliziter Kommunikation wird ausführlich in Kapitel 6.4 vorgestellt. Die in $\mathbf{M}_{\text{Kooperation}}$ vorliegenden Manöverobjekte steuern die weitere Handlungsgenerierung auf den tieferen Bearbeitungsebenen. Daher wird $\mathbf{M}_{\text{Kooperation}}$ sowohl der (Kurzzeit-) Trajektorienplanung als auch der Steuerung / Regelung zur Verfügung gestellt. Des Weiteren wird $\mathbf{M}_{\text{Kooperation}}$ der Interaktionsumsetzung übermittelt, um auch dort das Ergebnis der gemeinsamen Manöverplanung bekannt zu machen.

Für die Umsetzung der gemeinsamen Handlungsplanung hinsichtlich der Fahrstilparameter übermittelt die Bearbeitungsebene Manöverplanung der Interaktionsumsetzung die allgemeine Menge der Fahrstilparameter der Automation $P_{F, \text{Automation}}^{\text{allgemein}}$. Die Interaktionsumsetzung kann auf dieser Grundlage die Verhandlung mit dem Fahrer bezüglich der Fahrstilparameter mittels expliziter Kommunikation gestalten. Als Ergebnis legt die Interaktionsumsetzung die Fahrstilparameter $P_{F, \text{Interaktion}}^{\text{allgemein}}$ fest und überträgt sie zur Manöverplanung. Diese aktualisiert die in den Basismanöverobjekten vorhandenen Fahrstilparameter der Interaktionsumsetzung $P_{F, \text{Interaktion}}^m$ sowie der Automation $P_{F, \text{Automation}}^m$ unter Nutzung der jeweiligen allgemeinen Fahrstilparametermengen $(P_{F, \text{Automation}}^{\text{allgemein}}, P_{F, \text{Interaktion}}^{\text{allgemein}})$. Dazu wird die Operation *Aktualisiere Fahrstilparameter* der Manöverbasismenge M_{Basis} verwendet. Damit hat das Ergebnis einer expliziten Kommunikation mit dem Fahrer hinsichtlich Fahrstilparametern direkten Einfluss auf den Aufbau des Manöverbaumes $\mathbf{M}_{\text{Automation}}$.

Bearbeitungsebene (Kurzzeit-) Trajektorienplanung

Um eine aktuelle Umsetzung des Ergebnisses der gemeinsamen Handlungsplanung hinsichtlich der Fahrstilparameter zu gewährleisten, werden zu Beginn die Fahrstilparameter der Manöverobjekte in $\mathbf{M}_{\text{Kooperation}}$ mittels der Operation *Aktualisiere Fahrstilparameter* aktualisiert (siehe Abbildung 5.6). Anschließend erfolgt die Trajektorienplanung. Die (Kurzzeit-) Trajektorienplanung benutzt dazu die im Manöverbaum $\mathbf{M}_{\text{Kooperation}}$ enthaltene Operation *Berechne Trajektorienvalentialfeld* (siehe auch Tabelle 5.9). Das Ergebnis dieser Operation ist das Trajektorienvalentialfeld

T_{Kooperation}. Dieses wird von der Bearbeitungsebene (Kurzzeit-) Trajektorienplanung der Steuerung / Regelung und der Interaktionsumsetzung zur Verfügung gestellt.

Bearbeitungsebene Steuerung / Regelung

Bevor die eigentliche Steuerungs- oder Regelungsaufgabe erfüllt wird, erfolgt zunächst die Aktualisierung der Fahrstilparameter der Manöverobjekte in **M_{Kooperation}** mittels der Operation *Aktualisiere Fahrstilparameter* (siehe Abbildung 5.6). Somit wird auch auf der Bearbeitungsebene Steuerung / Regelung die aktuelle Umsetzung des Ergebnisses der gemeinsamen Handlungsplanung hinsichtlich der Fahrstilparameter gewährleistet.

Die anschließende Berechnung der Stellaktionspunkte wird durch den Manöverbaum **M_{Kooperation}** gesteuert. Dazu wird die in **M_{Kooperation}** enthaltene Operation *Berechne Stellaktionsvalentialfeld* angewendet (siehe auch Tabelle 5.9). Durch die in den Manöverobjekten vorhandenen Verknüpfungen zu den im Trajektorienvalentialfeld **T_{Kooperation}** enthaltenen Trajektorien liegen diese den Steuerungs- und Regelungsalgorithmen vor. In Abbildung 5.6 werden diese Verknüpfungen durch die Verbindung von **T_{Kooperation}** und **M_{Kooperation}** verdeutlicht. Die berechneten Stellaktionspunkte werden im Stellaktionsvalentialfeld **S_{Kooperation}** abgelegt. Als ausgeführter Stellaktionspunkt der Automation wird dabei der Stellaktionspunkt markiert, der zu dem von der Automation ausgeführten Manöver gehört, das in **M_{Kooperation}** markiert ist. Das Stellaktionsvalentialfeld **S_{Kooperation}** wird dann der Interaktionsumsetzung zur Verfügung gestellt. Dadurch erhält die Interaktionsumsetzung die Möglichkeit, dem Fahrer die Stellaktionen der Automation bekannt zu machen. Damit kann die von dem Kooperation ausmachenden Element gemeinsame Handlungsausführung gestellte Anforderung, dass der Fahrer die Stellaktionen der Automation wahrnehmen können muss, erfüllt werden (siehe Kapitel 3.2.3).

Für die weitere Umsetzung der gemeinsamen Handlungsausführung ist die Funktion *Ermögliche gemeinsame Handlungsausführung* verantwortlich. Diese Funktion realisiert auf der Bearbeitungsebene Steuerung / Regelung die variablen Kontrollanteile von Fahrer und Automation. Die Kontrollverteilung ergibt sich in dieser Funktion aus dem direkten Kontrollanteil der Automation und dem von der Interaktionsumsetzung wahrgenommenen Kontrollanteil. Unter Verwendung dieser Kontrollanteile erfolgt direkt die Ansteuerung der Fahrzeugaktorik mittels der Stellgrößen.

Der von der Interaktionsumsetzung wahrgenommene Kontrollanteil kann wiederum durch den Fahrer oder die Automation erfüllt werden. Damit ergeben sich der Kontrollanteil des Fahrers und ein zusätzlicher indirekter Kontrollanteil der Automation, der sich durch einen nicht vorhandenen direkten Zugriff auf die Stellgrößen des Fahrzeuges auszeichnet. Für diese Art der Kontrollerfüllung durch die Automation nutzt die Interaktionsumsetzung eine im Stellaktionsvalentialfeld **S_{Kooperation}** enthaltene Stellaktion und erzeugt basierend auf dieser eine Einwirkung auf ein Stellteil auf das auch der Fahrer einwirken kann. Die an diesem Stellteil eingestellte Stellaktion wird dann der Bearbeitungsebene Steuerung / Regelung zur Erfüllung des von der Interaktionsumsetzung wahrgenommenen Kontrollanteiles übermittelt. Die konkrete Ausgestaltung des indirekten Kontrollanteiles der Automation erfolgt im Rahmen der Interaktionsgestaltung, auf die in der vorliegenden Arbeit nicht weiter eingegangen wird.

Der Fokus liegt hier auf der Realisierung der Verteilung der Kontrollanteile in der Funktion *Ermögliche gemeinsame Handlungsausführung* auf der Bearbeitungsebene Steuerung / Regelung. Die

Verteilung der Kontrolle auf den direkten Kontrollanteil der Automation und den von der Interaktionsumsetzung wahrgenommenen Kontrollanteil wird durch die Interaktionsumsetzung gesteuert und kann zur Laufzeit ständig verändert werden. Daher übermittelt die Interaktionsumsetzung der Funktion *Ermögliche gemeinsame Handlungsausführung* den von der Interaktionsumsetzung wahrgenommenen Kontrollanteil in Längsrichtung $\lambda_{\eta}^{Interaktion}$ und in Querrichtung $\lambda_{\delta}^{Interaktion}$. Der Wertebereich von $\lambda_{\eta}^{Interaktion}$ und $\lambda_{\delta}^{Interaktion}$ wird durch das Intervall $[0, 1]$ gebildet. Der Wert 1 bedeutet, dass die Kontrolle vollständig von der Interaktionsumsetzung wahrgenommen wird. Die direkten Kontrollanteile der Automation sind für die Längsrichtung $\lambda_{\eta}^{Automation} = 1 - \lambda_{\eta}^{Interaktion}$ und für die Querrichtung $\lambda_{\delta}^{Automation} = 1 - \lambda_{\delta}^{Interaktion}$ (Wertebereich jeweils $[0, 1]$). Ein Wert von 1 für $\lambda_{\eta}^{Automation}$ oder $\lambda_{\delta}^{Automation}$ bedeutet, dass die direkte Kontrolle in der Längs- oder Querrichtung vollständig bei der Automation liegt.

Zur Erfüllung des von der Interaktionsumsetzung wahrgenommenen Kontrollanteiles übermittelt die Interaktionsumsetzung die unter Nutzung der Stellteile ermittelten normierten Stellgrößen $\eta_{norm}^{Interaktion}$ und $\delta_{norm}^{Interaktion}$. Anhand der aktuell vorliegenden Verteilung der Kontrollanteile werden in der Funktion *Ermögliche gemeinsame Handlungsausführung* $\eta_{norm}^{Interaktion}$ und $\delta_{norm}^{Interaktion}$ und der ausgeführte Stellaktionspunkt der Automation aus dem Stellaktionsvalentialfeld $\mathbf{S}_{Kooperation}$ zu den zur Ansteuerung der Fahrzeugaktorik verwendeten Stellgrößen $\eta_{norm}^{Fahrzeug}$ und $\delta_{norm}^{Fahrzeug}$ zusammengeführt. Somit können sowohl der Fahrer als auch die Automation auf die Stellgrößen des Fahrzeuges einwirken, wodurch die gemeinsame Handlungsausführung ermöglicht wird.

5.4 Zusammenfassung des Kapitels

In diesem Kapitel wurde ein Ansatz zur manöverbasierten Umsetzung der kooperativen Automation für das teil- und hochautomatisierte Fahren ausgearbeitet. Die in Kapitel 4 vorgestellte technische Konkretisierung des Konzeptes der kooperativen Automation diente als Grundlage für die Konzipierung dieser Umsetzung. Insbesondere wurden bei der Konzipierung der Umsetzung die Kooperation ausmachenden Elemente Kompatibilität, gemeinsamer Aufbau des Situationsbewusstseins, gemeinsame Handlungsplanung, gemeinsame Handlungsausführung, Kommunikation sowie Rolle und Entscheidungsspielraum (siehe dazu Kapitel 3.2 und Tabelle C.1) adressiert.

Im Mittelpunkt der Umsetzung steht die objektorientierte Modellierung der Manöver. Die für diese Modellierung entworfenen Manöverklassen wurden zunächst mit ihren Attributen und Operationen dargestellt. Außerdem erfolgte die Vorstellung der für die Umsetzung der kooperativen Automation für das Autobahnscenario modellierten Manöver. Im Anschluss wurden der weitere objektorientierte Softwareentwurfes für die Umsetzung der kooperativen Automation und die Einbettung der objektorientierten Modellierung der Manöver in diesen Softwareentwurf beleuchtet. Abschließend erfolgte die Erläuterung des unter Verwendung des objektorientierten Softwareentwurfes für die manöverbasierte Umsetzung konzipierten Softwareablaufes.

Ein Vorteil der manöverbasierten Modellierung ist die einfache Erweiterbarkeit des von der Automation umfassten Verhaltens- und Situationsumfanges durch das Hinzufügen von Manövern, um so auch andere Szenarien (zum Beispiel urbane Szenarien) zu realisieren. Des Weiteren ist die Modellierung sämtlicher für ein Manöver benötigter Fähigkeiten in einer Manöverklasse sowohl für die Nutzung in der Interaktionsumsetzung als auch bei der Entwicklung von neuen Manövern vorteil-

haft. Der Interaktionsumsetzung wird so für die Gestaltung der Kommunikation mit dem Fahrer ein zentraler Zugriffspunkt für sämtliche hinsichtlich eines Manövers relevanten Informationen geboten. Bei der Entwicklung eines neuen Manövers kann so gezielt in der neuen Manöverklasse dieses Manöver modelliert werden, ohne bestehende Manöver zu beeinflussen. Außerdem ermöglicht es die durch eine Manöverklasse gebotene zentrale Übersicht aller für ein Manöver modellierten Fähigkeiten, dem Entwickler einen guten Überblick diesbezüglich zu behalten.

Die wesentliche Neuheit der in diesem Kapitel vorgestellten Überlegungen liegt in der Darstellung eines umfassenden Konzeptes zur technischen Umsetzung der kooperativen Automation für das teil- und hochautomatisierte Fahren. Damit trägt dieses Kapitel zur Beantwortung der zweiten zentralen Fragestellung dieser Arbeit „Welche Konzepte und Methoden eignen sich für die technische Umsetzung der kooperativen Automation für das teil- und hochautomatisierte Fahren?“ bei. Einen weiteren Beitrag zur Beantwortung dieser Fragestellung liefert das folgende Kapitel 6. In diesem wird die Umsetzung der Bearbeitungsebene Manöverplanung ausführlich beschrieben. Die zur Beantwortung der Fragestellung ausstehenden technischen Evaluierungen erfolgten im Rahmen des in dieser Arbeit angewendeten iterativen Entwicklungsprozesses. In Kapitel 8 werden diese Evaluierungen dargestellt.

Die folgende Tabelle 5.10 gibt abschließend eine Kurzzusammenfassung des vorliegenden Kapitels 5.

Inhalt des Kapitels
<ul style="list-style-type: none"> • Ansatz zur manöverbasierten Umsetzung der kooperativen Automation • Objektorientierte Modellierung der Manöver mit Darstellung der Manöverklassen mit Attributen und Operationen • Vorstellung konkreter für das Autobahnszenario modellierter Manöver • Umfassender objektorientierter Softwareentwurf für weitere Elemente zur Umsetzung der kooperativen Automation (relevante Situationsmerkmale, Fahrstilparameter, Manövermenge, Manöverbaum, Trajektorie, Trajektorienvallentiafeld, Stellaktionspunkt, Stellaktionsvallentiafeld) • Softwareablauf der manöverbasierten Umsetzung der kooperativen Automation
Beitrag zum Stand der Technik
<ul style="list-style-type: none"> • Darstellung eines umfassenden Konzeptes zur technischen Umsetzung der kooperativen Automation für das teil- und hochautomatisierte Fahren • Das Manöver als zentraler Baustein für die Umsetzung der Kooperation
Stand bezüglich der Fragestellungen der Arbeit
<p>Fragestellung 2: „Welche Konzepte und Methoden eignen sich für die technische Umsetzung der kooperativen Automation für das teil- und hochautomatisierte Fahren?“</p> <p>Erreichter Stand hinsichtlich der Beantwortung der Fragestellung 2:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Vorgestelltes manöverbasiertes Umsetzungskonzept bildet die Grundlage zur Beantwortung der Fragestellung <p>Offen zur vollständigen Beantwortung der Fragestellung 2:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Technische Evaluierung hinsichtlich der Erfüllung der avisierten Funktionalität → Kapitel 8 <p>Weiterer Beitrag zur detaillierteren Beantwortung der Fragestellung 2:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ausführliche Beschreibung der Umsetzung der Bearbeitungsebene Manöverplanung → Kapitel 6 • Detaillierte exemplarische Beschreibung der Modellierung des Manövers „Fahrstreifen wechseln“ → Kapitel 7

Tabelle 5.10: Kurzzusammenfassung von Kapitel 5

6 Umsetzung der Bearbeitungsebene Manöverplanung der kooperativen Automation

Nachdem im vorherigen Kapitel (Kapitel 5) die manöverbasierte Umsetzung der drei Bearbeitungsebenen Manöverplanung, (Kurzzeit-) Trajektorienplanung und Steuerung / Regelung konzipiert wurde, erfolgt nun die detaillierte Vorstellung der Umsetzung der Bearbeitungsebene Manöverplanung. Die Aufgabe der Bearbeitungsebene Manöverplanung ist die Planung der als Nächstes auszuführenden Manöver (siehe Kapitel 4.2.2.4), die mittels des Manöverbaumes dargestellt werden (siehe Kapitel 4.3.1). Hinsichtlich der Umsetzung der Kooperation ausmachenden Elemente liegt der Fokus des vorgestellten Ansatzes zur Manöverplanung auf der Realisierung der Elemente Kompatibilität, gemeinsame Handlungsplanung, gemeinsame Handlungsausführung, Rolle und Entscheidungsspielraum sowie Kommunikation (siehe Kapitel 3.2 und Tabelle C.1).

Abbildung 6.1 zeigt den Aufbau der Umsetzung der Bearbeitungsebene Manöverplanung. Zunächst erfolgt basierend auf den relevanten Situationsmerkmalen SM der Aufbau des aktuellen Manöverbaumes der Automation $\mathbf{M}_{Automation}$. Anschließend erfolgt unter Berücksichtigung des Entscheidungsspielraumes die Festlegung des Manövers im Manöverbaum $\mathbf{M}_{Automation}$, welches die Automation beabsichtigt auszuführen. Im nächsten Schritt erfolgt die Ermöglichung der gemeinsamen Manöverplanung mit dem Fahrer mittels impliziter Kommunikation unter Nutzung des Manöverbaumes $\mathbf{M}_{Automation}$. Als Resultat dieses Schrittes liegt der Manöverbaum $\mathbf{M}_{Automation+}$ vor, der sich gegebenenfalls durch eine Anpassung des in $\mathbf{M}_{Automation}$ enthaltenen Manöverplanes von diesem Manöverbaum unterscheidet. Die abschließende Aufgabe besteht in der Ermöglichung der gemeinsamen Manöverplanung mittels expliziter Kommunikation unter Nutzung der Manöverbäume $\mathbf{M}_{Automation+}$ sowie $\mathbf{M}_{Interaktion}$. Das Ergebnis wird im Manöverbaum $\mathbf{M}_{Kooperation}$ dargestellt und den weiteren Bearbeitungsebenen zur Verfügung gestellt (siehe Kapitel 5.3). Für die Umsetzung der Kommunikation mit dem Fahrer ist die Interaktionsumsetzung zuständig, die dazu die Manöverbäume $\mathbf{M}_{Automation+}$ und $\mathbf{M}_{Kooperation}$ erhält und das Ergebnis der Kommunikation mit dem Fahrer in $\mathbf{M}_{Interaktion}$ darstellt.

Der Bezug der in Abbildung 6.1 skizzierten Funktionsblöcke zum Softwareablauf der manöverbasierten Umsetzung der kooperativen Automation (siehe Abbildung 5.6) wird in Abbildung 6.2 dargestellt. Es erfolgte dazu die Zuordnung der einzelnen Elemente des Softwareablaufes auf der Bearbeitungsebene Manöverplanung zu den Funktionsblöcken.

Wie bereits in Kapitel 1.4 angemerkt wurde, wird bei den Überlegungen zur Umsetzung der kooperativen Automation inklusive der Bearbeitungsebene Manöverplanung nicht tiefgehend auf die Themen der Gewährleistung von funktionaler Sicherheit und Zuverlässigkeit eingegangen, da im Rahmen der vorliegenden Arbeit die generelle Umsetzbarkeit im Vordergrund steht. Generell liegen Ansätze zur Adressierung dieser Themen einerseits in der Implementierung von Sicherheitsmechanismen in der Automation, die von der eigentlichen Manöverplanung unabhängig sind und somit zur Überprüfung der Funktion und ihrer Berechnungsergebnisse dienen können. Andererseits können die Sicherheit und Zuverlässigkeit durch die Anwendung formaler Methoden sowie strukturiertes

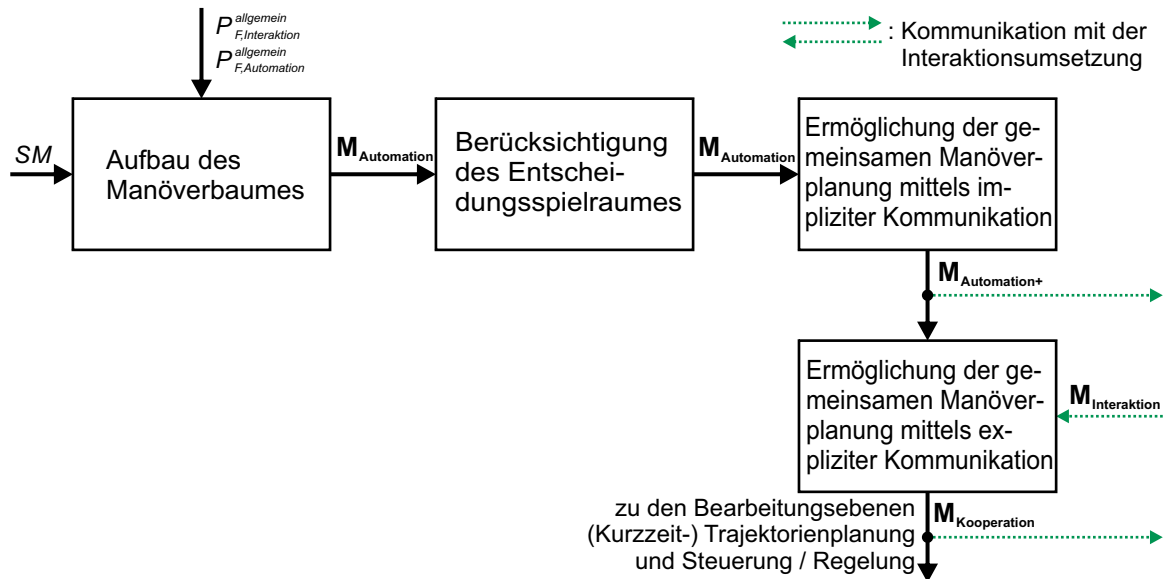


Abbildung 6.1: Aufbau der Umsetzung der Bearbeitungsebene Manöverplanung der kooperativen Automation

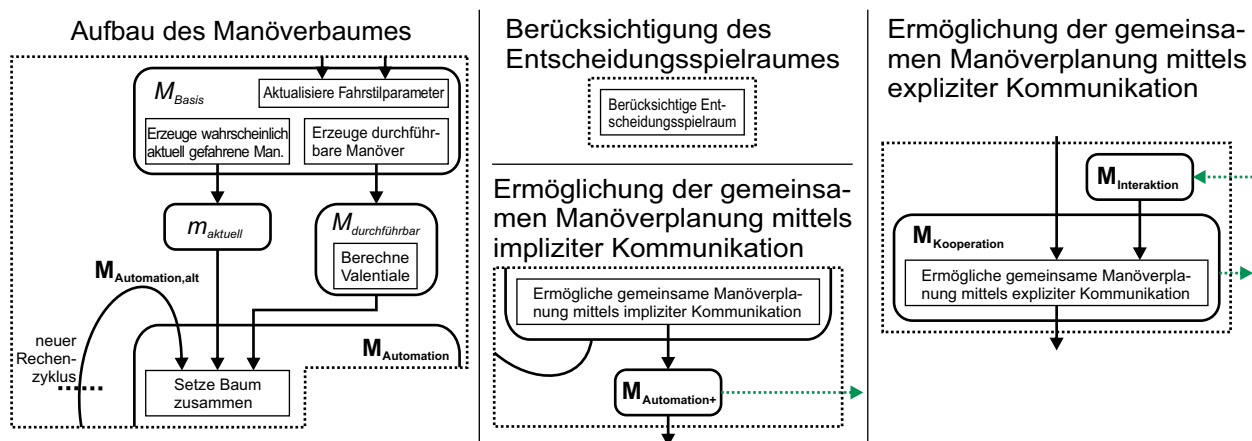


Abbildung 6.2: Bezug der Funktionsblöcke auf der Bearbeitungsebene Manöverplanung (siehe Abbildung 6.1) zum entworfenen Softwareablauf (siehe Abbildung 5.6)

und automatisiertes Testen nachgewiesen werden. Aufgrund der Wichtigkeit der Thematik wird sie im Weiteren aber dennoch kurz angerissen.

Im Folgenden wird zunächst das für den Aufbau des Manöverbaumes entwickelte Vorgehen beschrieben (Kapitel 6.1). Kapitel 6.2 beleuchtet anschließend die Berücksichtigung des Entscheidungsspielraumes. Abschließend fokussieren die Kapitel 6.3 und 6.4 auf die Ermöglichung der gemeinsamen Manöverplanung, der gemeinsamen Handlungsplanung von Automation und Fahrer auf der Bearbeitungsebene Manöverplanung. Kapitel 6.3 beleuchtet die gemeinsame Manöverplanung mittels impliziter Kommunikation, Kapitel 6.4 die gemeinsame Manöverplanung mittels expliziter Kommunikation.

Erste Überlegungen zur Umsetzung der Bearbeitungsebene Manöverplanung der kooperativen Automation wurden vom Autor dieser Arbeit bereits kurz in [128] vorgestellt. Das vorliegende Kapitel basiert auf diesen Überlegungen.

6.1 Aufbau des Manöverbaumes

Abbildung 6.3 zeigt schematisch den Aufbau des Manöverbaumes auf der Bearbeitungsebene Manöverplanung. Als Eingangsgrößen werden die relevanten Situationsmerkmale SM sowie die allgemeinen Fahrstilparameter ($P_{F, Automation}^{allgemein}$, $P_{F, Interaktion}^{allgemein}$) verwendet. Als die dem Aufbau des Manöverbaumes zugrunde liegende Methode wurde die Fuzzy Logik gewählt (Kapitel 6.1.1). Diese erfordert die Fuzzifizierung der Eingangsdaten (für eine kurze Einführung in die Fuzzy Logik siehe Anhang A.1). Um den Manöverbaum aufzubauen, sind die Bestimmung der Menge der durchführbaren Manöver $M_{durchführbar}$ (Kapitel 6.1.2) und ihrer Valentiale (Kapitel 6.1.3) sowie die Erkennung des wahrscheinlich aktuell vom Fahrzeug gefahrenen Manövers $m_{aktuell}$ (Kapitel 6.1.4) nötig. Der Manöverbaum der Automation $M_{Automation}$ wird anschließend aus $M_{durchführbar}$ und $m_{aktuell}$ zusammengesetzt (Kapitel 6.1.5). Zur Gewährleistung der Kontinuität der Handlungsgenerierung über einzelne Rechenzyklen hinaus wird bei dem Zusammensetzen von $M_{Automation}$ der im letzten Rechenzyklus aufgebaute Manöverbaum $M_{Automation, alt}$ berücksichtigt. Die Entscheidungshysteresse sorgt für die kompatible Modellierung von Trägheitstendenzen des Fahrers und die Stabilität der Manöverentscheidungen (Kapitel 6.1.6). Die Thematik der Gewährleistung der funktionalen Sicherheit beim Aufbau des Manöverbaumes wird abschließend in Kapitel 6.1.7 angerissen.

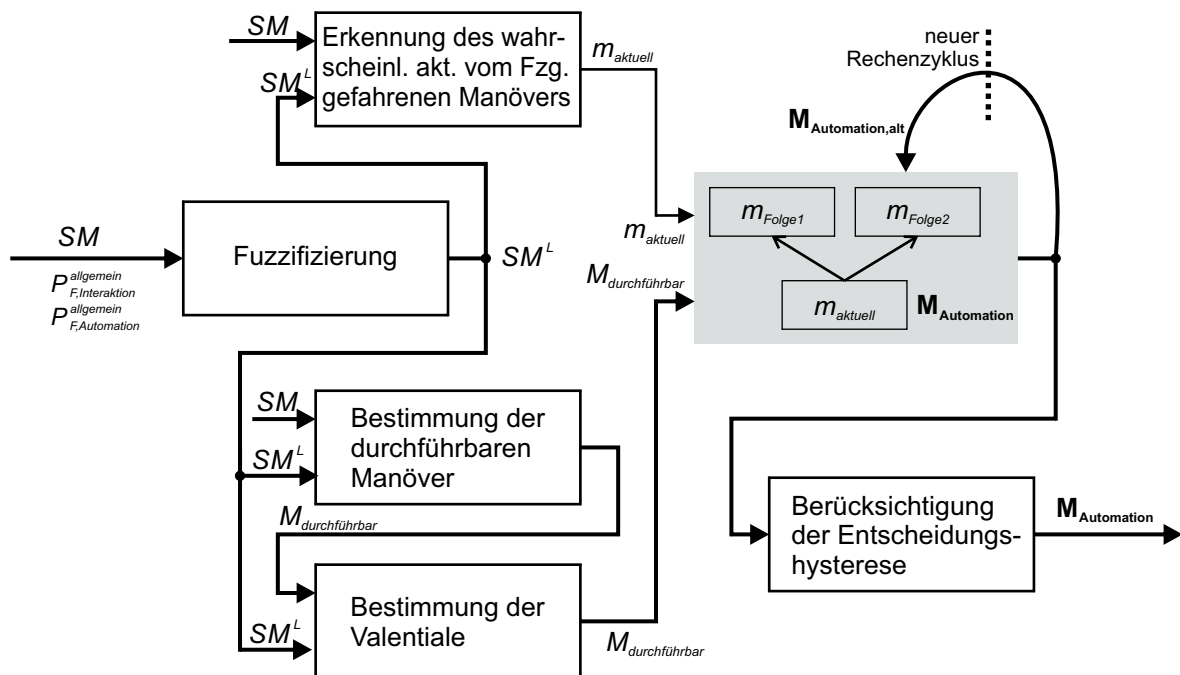


Abbildung 6.3: Aufbau des Manöverbaumes

6.1.1 Auswahl der Fuzzy Logik als Methode

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde die Fuzzy Logik als die für die Manöverplanung genutzte Methode ausgewählt (für eine kurze Einführung in die Fuzzy Logik siehe Anhang A.1). Um diese Wahl zu begründen, werden im Folgenden die Anforderungen aufgeführt, die von dieser Methode erfüllt werden sollen. Diese Anforderungen beschränken sich auf den Fokus der vorliegenden Arbeit, darüber hinausgehende Anforderungen werden hier nicht betrachtet. Des Weiteren erfolgt

eine Bewertung von infrage kommenden Methoden anhand dieser Anforderungen. Abschließend wird die Auswahl der Fuzzy Logik zusammenfassend begründet.

Die einzelnen Anforderungen ergeben sich aus der Aufgabenbeschreibung der Manöverplanung (siehe Kapitel 4.2.2.4), dem Valentalkonzept für die gemeinsame Handlungsplanung (siehe Kapitel 4.1), der Beschreibung des Manöverbaumes (siehe Kapitel 4.3.1) sowie der Anforderung der Gewährleistung von Kompatibilität zum Fahrer. Die Grundlage für die Erreichung der Kompatibilität bildet die in Kapitel 4.4 beschriebene Vorgehensweise zur Entwicklung kompatibler Ziele, Werte und Methoden für die kooperative Automation. Bezüglich der Kooperation ausmachenden Elemente sind für die Methodenauswahl insbesondere die Elemente Kompatibilität, gemeinsame Handlungsplanung, gemeinsame Handlungsausführung, Rolle und Entscheidungsspielraum sowie Kommunikation (siehe Kapitel 3.2) relevant.

In den folgenden Tabellen 6.1 und 6.2 werden die einzelnen Anforderungen aufgeführt und anhand dieser ausgewählte, infrage kommende Methoden bzw. Methodenklassen bewertet. Die Auswahl der infrage kommenden Methoden erfolgte anhand von aus der Literatur bekannten Arbeiten, welche Aufgaben der Manöverplanung adressieren. Anhang A.2 gibt einen Überblick über diese Arbeiten. Die betrachteten Methoden sind im Einzelnen: Fuzzy Logik, zweiwertige Logiken (zum Beispiel genutzt in Zustandsautomaten oder Petri-Netzen), probabilistische Verfahren (zum Beispiel Bayes'sche Netze), maschinelles Lernen (zum Beispiel neuronale Netze). Zur Bewertung der Anforderungserfüllung werden die Markierungen „0“ für eine nicht oder nur schwer erfüllbare Anforderung, „+“ für eine erfüllbare Anforderung und „++“ für eine sehr gut erfüllbare Anforderung verwendet.

Bei der Gesamtbetrachtung der in den Tabellen 6.1 und 6.2 dargestellten Bewertungen der Anforderungserfüllung wird deutlich, dass sich die Fuzzy Logik zur Erfüllung dieser Anforderungen sehr gut eignet. Positiv hervorzuheben ist in diesem Kontext insbesondere, dass die Fuzzy Logik eine transparente und leicht nachvollziehbare Modellierung von komplexen, durch Regeln beschreibbaren Zusammenhängen ermöglicht. Durch die Regelformulierung mittels natürlichsprachlicher Begriffe ist die Modellierung bedeutungserhaltend und damit gut nachzuvollziehen. Diese Eigenschaften bieten zum einen bei dem Aufbau der kompatiblen Wissensbasis auf der Grundlage von Expertenwissen und den Ergebnissen von Analysen des Fahrverhaltens von Fahrern einen bedeutenden Vorteil. Zum anderen sind sie vor dem Hintergrund der Anforderung der Erweiterbarkeit und Anpassbarkeit des modellierten Wissens unter Gewährleistung von Kompatibilität zum Fahrer sehr vorteilhaft. Diese Sichtweise vertreten zum Beispiel auch Pfeiffer et al. [164, 165] in einem Übersichtsartikel, der verschiedenste Anwendungen von Fuzzy Logik und Fuzzy Control beleuchtet: „Die sprachliche Darstellung von Informationen ist ein spezifischer Vorteil von Fuzzy Control-Lösungen, indem das Expertenwissen, z. B. das Erfahrungswissen von Bedienern, in verständlicher, von anderen leicht nachvollziehbarer und später leicht modifizierbarer Form dokumentiert wird“. Darüber hinaus bietet die von der Fuzzy Logik gebotene Verarbeitungsmöglichkeit von begrifflichen Beschreibungen und unscharfem Wissen eine sehr gute Möglichkeit, mit der in dieser Arbeit verwendeten Definition des Manöverbegriffs umzugehen.

Nachteilig bleibt anzumerken, dass die Gewährleistung der funktionalen Sicherheit und Zuverlässigkeit bei der Fuzzy Logik schwieriger ist, als bei anderen Methoden (zum Beispiel bei zweiwertigen Logiken). Dieses liegt in der Nichtlinearität von Fuzzy Logik begründet. Dadurch wird

	Fuzzy Logik	Zwewertige Logiken	Probabilistische Verfahren	Maschinelles Lernen
Gegenstand der Modellierung: Definition Manöverbegriff				
Ein Manöver ist eine begriffliche Beschreibung einer Fahrzeugbewegung im Kontext der Umgebung des Fahrzeuges (siehe Definition 4.1). Daher sollen begriffliche Beschreibungen verarbeitet werden können.	++	+	0	0
Die Fahrzeugbewegung ist durch ein Manöver nicht genau spezifiziert, ein Manöver umfasst vielmehr viele gleichartige Bewegungen im Kontext der Umgebung (siehe Definition 4.1). Daher sollen unscharf definierte Manöver verarbeitet werden können.	++	0	0	0
Gegenstand der Modellierung: Aufgaben der Manöverplanung				
Es soll das wahrscheinlich aktuell vom Fahrzeug gefahrene Manöver erkannt werden.	++	++	++	++
Es sollen sämtliche durchführbare Manöver bestimmt werden.	++	++	++	++
Die Manöver sollen hinsichtlich von Zielen und Werten bewertet werden (Ermittlung relativer Wert).	++	+	++	++
Es sollen kontinuierliche Bewertungen (0...1) bestimmt werden für: Wahrscheinlichkeit aktuell gefahrenes Manöver w_{aktuell} , Durchführbarkeit d , relativer Wert w_{rel} .	++	0	++	++
Eigenschaften des zu modellierenden Wissens				
Das zu modellierende Wissen liegt explizit vor, derartig soll es auch modelliert werden.	++	++	++	0
Das zu modellierende Wissen basiert unter anderem auf Expertenwissen, das explizit modelliert werden soll.	++	++	++	0
Das zu modellierende Wissen umfasst Ergebnisse aus Analysen des Fahrverhaltens von Fahrern (zum Beispiel statistisch ermittelte Häufigkeitsverteilungen), die explizit modelliert werden sollen.	++	+	+	0
Das zu modellierende Wissen ist kein Modell des Fahrverhaltens von Fahrern, sondern es ist kompatibel. Daher sollen Expertenwissen und Ergebnisse aus Analysen des Fahrverhaltens von Fahrern explizit integriert werden können.	++	+	++	0
Das zu modellierende Wissen ist teils unscharf formuliert. Dies zu modellieren soll ermöglicht werden.	++	0	0	0
Ziele, Werte und ihre Auswirkungen sollen explizit modelliert werden können.	++	+	++	0
Die Eigenschaften der Manöver sollen explizit modelliert werden können.	++	+	++	0
Das zu modellierende Wissen besteht unter anderem aufgrund der Kompatibilität zum Fahrer in großen Teilen aus Regeln. Die Modellierung soll dies möglichst intuitiv, transparent und nahe an natürlichsprachlichen Regeln ermöglichen.	++	+	+	0
Es soll die Abbildung verschiedener Fahrstile ermöglicht werden.	++	+	++	++
Die Kompatibilität des modellierten Wissens zum Fahrer soll möglichst transparent sichergestellt werden können.	++	+	+	0

Tabelle 6.1: Anforderungen an die für die Manöverplanung genutzte Methode und Bewertung von ausgewählten Methoden anhand dieser Anforderungen (0: nicht oder nur schwer erfüllbare Anforderung, +: erfüllbare Anforderung, ++: sehr gut erfüllbare Anforderung) (1/2)

	Fuzzy Logik	Zwewertige Logiken	Probabilistische Verfahren	Maschinelles Lernen
Entwicklungsvorgehen zum Aufbau der kompatiblen Wissensbasis				
Die Grundlage der Wissensbasis bilden Expertenwissen und Ergebnisse aus Analysen des Fahrverhaltens von Fahrern. Darauf aufbauend wird sie in einem iterativen Entwicklungsprozess angepasst, ergänzt, verfeinert und validiert. Dazu werden unter anderem Nutzererwartungen abgefragt und Probandenstudien durchgeführt (siehe Kapitel 4.4). Daher soll eine möglichst intuitive und transparente Anpassung, Ergänzung und Verfeinerung des modellierten Wissens ermöglicht werden.	++	+	+	0
Um die funktionale Sicherheit und Zuverlässigkeit des Ansatzes zu gewährleisten, sollen dahingehende Nachweise ermöglicht werden.	+	++	+	0

Tabelle 6.2: Anforderungen an die für die Manöverplanung genutzte Methode und Bewertung von ausgewählten Methoden anhand dieser Anforderungen (0: nicht oder nur schwer erfüllbare Anforderung, +: erfüllbare Anforderung, ++: sehr gut erfüllbare Anforderung) (2/2)

ein Nachweis der funktionalen Sicherheit und Zuverlässigkeit mit formalen Methoden deutlich erschwert. Zur bestmöglichen Gewährleistung von funktionaler Sicherheit und Zuverlässigkeit bleibt dann nur die Durchführung umfangreicher Tests (zum Beispiel Monte-Carlo Tests). Die Aussagekraft ist dabei allerdings geringer als bei einem Nachweis mittels formaler Methoden. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird dieser Nachteil in Kauf genommen, da die übrigen Anforderungen sehr gut erfüllt werden und die Gewährleistung von funktionaler Sicherheit und Zuverlässigkeit nicht im Fokus dieser Arbeit stehen. Der Umgang mit dieser Thematik wird in Kapitel 6.1.7 dennoch detaillierter angerissen.

6.1.2 Bestimmung der durchführbaren Manöver

Die Bestimmung der durchführbaren Manöver bildet, wie Abbildung 6.3 zeigt, einen Ausgangspunkt bei dem Aufbau des Manöverbaumes. Im Weiteren wird zunächst die auf der Nutzung der Fuzzy Logik basierende Vorgehensweise zur Bestimmung der durchführbaren Manöver beschrieben. Anschließend erfolgt anhand der Betrachtung der Anforderungen die Erläuterung der Systematik zur Formulierung der linguistischen Regeln für die Bestimmung der Durchführbarkeiten der einzelnen Manöver.

6.1.2.1 Vorgehensweise zur Bestimmung der durchführbaren Manöver

Um die in der betrachteten Situation durchführbaren Manöver (siehe Definition 4.2) zu bestimmen, werden für jedes verfügbare Manöver unter Berücksichtigung der jeweiligen Ausprägungen und Phasen die Durchführbarkeiten d (Definition der Durchführbarkeit siehe Kapitel 4.1) ermittelt. Die Notwendigkeit zur Berücksichtigung der Ausprägungen und Phasen der Manöver ergibt

sich dadurch, dass ein Manöver in einer Situation mit verschiedenen Belegungen dieser Attribute durchführbar sein kann. Ein Beispiel ist das Manöver „Fahrstreifen wechseln“, das in einer Situation sowohl mit der Ausprägung „nach links“ als auch „nach rechts“ durchführbar sein kann.

Zur Berücksichtigung dieser Ausprägungen und Phasen werden einzelne Durchführbarkeiten d für jede mögliche Kombination von Ausprägung und Phase eines Manövers berechnet. Ist eine Durchführbarkeit größer als d_{min} , so ist das Manöver mit dieser Ausprägung und Phase durchführbar. Wenn ein Manöver mit verschiedenen Kombinationen von Ausprägung und Phase durchführbar ist, wird durch jede Kombination ein eigenständiges durchführbares Manöver gebildet. Für das Beispiel des Manövers „Fahrstreifen wechseln“ bedeutet dies, dass in einer Situation zwei eigenständige durchführbare Manöver „Fahrstreifen wechseln“ existieren können, von denen eines die Ausprägung „nach links“ aufweist sowie eines die Ausprägung „nach rechts“. Ein durchführbares Manöver ist somit eindeutig bestimmt durch den Manöverbegriff B , die Ausprägung α und die Phase p .

Im Rahmen der manöverbasierten Umsetzung der kooperativen Automation (siehe Kapitel 5) erfolgt die Realisierung der Berechnung der Durchführbarkeiten für ein Manöver in der Operation *Erzeuge durchführbare Manöver* in dessen spezialisierter Manöverklasse (siehe Kapitel 5.1.2). Ist das Manöver mit einer bestimmten Kombination von Ausprägung und Phase durchführbar ($d > d_{min}$), wird ein neues Manöverobjekt der spezialisierten Manöverklasse mit dieser Belegung der Attribute instanziiert. Diese neu instanziierten Manöverobjekte einer spezialisierten Manöverklasse bilden die Manövermenge M_{d,B_i} und zeichnen sich durch den gleichen Manöverbegriff B aus.

Zur Laufzeit der manöverbasierten Umsetzung liegt eine Instanz jeder spezialisierten Manöverklasse in der Manöverbasismenge als Basismanöverobjekt vor (siehe Kapitel 5.3). Mittels der Operation *Erzeuge durchführbare Manöver* der Manövermenge (siehe Kapitel 5.2) werden die jeweiligen Operationen *Erzeuge durchführbare Manöver* der Basismanöverobjekte aufgerufen. Die gesamte Menge der durchführbaren Manöver $M_{durchführbar}$ wird von der Operation *Erzeuge durchführbare Manöver* der Manövermenge durch das Vereinigen der einzelnen, von den Operationen *Erzeuge durchführbare Manöver* der Basismanöverobjekte zurückgegeben, Mengen M_{d,B_i} gebildet. Die Operation *Erzeuge durchführbare Manöver* des Basismanöverobjektes „Fahrstreifen wechseln“ kann zum Beispiel eine Manövermenge $M_{d,Fahrstreifen_wechseln}$ zurückgeben, die ein Manöverobjekt „Fahrstreifen wechseln“ mit der Ausprägung „nach links“ und ein Manöverobjekt „Fahrstreifen wechseln“ mit der Ausprägung „nach rechts“ enthält. Für n_M im System enthaltene Basismanöverobjekte ergibt sich $M_{durchführbar}$ mit $n_{durchführbar}$ enthaltenen Manöverobjekten:

$$M_{durchführbar} = M_{d,B_1} \cup M_{d,B_2} \cup \dots \cup M_{d,B_i} \cup \dots \cup M_{d,B_{n_M}} \quad (6.1)$$

Die Vorgehensweise zur Bestimmung der durchführbaren Manöver M_{d,B_i} eines mit dem Manöverbegriff B_i bezeichneten Manövers zeigt Abbildung 6.4. Zuerst erfolgt die Berechnung der einzelnen Durchführbarkeiten d für jede mögliche Kombination von Ausprägung und Phase des Manövers. Da die Berechnung der Durchführbarkeiten auf der Methode der Fuzzy Logik basiert, dienen die unter Berücksichtigung der Fahrstilparameter fuzzifizierten linguistischen Situationsmerkmale SM^L als Eingangswerte. Für die Bestimmung der Durchführbarkeit des Manövers mit einer bestimmten Belegung der Ausprägung und Phase wird jeweils eine unabhängige linguistische Regel verwen-

det. Für ein im System vorhandenes Manöver i mit $n_{i,\alpha}$ Ausprägungen und $n_{i,p}$ Phasen ergeben sich damit $n_{i,\alpha} \cdot n_{i,p}$ linguistische Regeln. Die gesamte Regelbasis für ein Manöver i ist wie folgt definiert:

$$\begin{aligned}
 R-i_{11_d}: & \text{ WENN } \left(SM_1^L \text{ klein UND } SM_2^L \text{ groß UND } \dots \right) \text{ DANN } Mi_a1_p1^L \text{ durchführbar} \\
 R-i_{12_d}: & \text{ WENN } \dots \text{ DANN } Mi_a1_p2^L \text{ durchführbar} \\
 & \vdots \\
 R-i_{1n_{i,p}_d}: & \text{ WENN } \dots \text{ DANN } Mi_a1_pn_{i,p}^L \text{ durchführbar} \\
 R-i_{21_d}: & \text{ WENN } \dots \text{ DANN } Mi_a2_p1^L \text{ durchführbar} \\
 & \vdots \\
 R-i_{n_{i,\alpha}n_{i,p}_d}: & \text{ WENN } \dots \text{ DANN } Mi_an_{i,\alpha}_pn_{i,p}^L \text{ durchführbar}
 \end{aligned}$$

Die Erfülltheit der Konklusion einer Regel modelliert direkt die Durchführbarkeit des Manövers mit der durch die Regel adressierten Ausprägung und Phase. Eine Defuzzifizierung ist daher nicht notwendig. Damit ergeben sich die Durchführbarkeiten des Manövers $d_{i_11} \dots d_{i_{n_{i,\alpha}n_{i,p}}}$ als Erfülltheiten der linguistischen Werte „durchführbar“ der linguistischen Variablen $Mi_a1_p1 \dots Mi_an_{i,\alpha}_pn_{i,p}$:

$$\begin{aligned}
 d_{i_11} &= \mu_{Mi_a1_p1, \text{durchführbar}} \\
 d_{i_12} &= \mu_{Mi_a1_p2, \text{durchführbar}} \\
 &\vdots \\
 d_{i_{1n_{i,p}}} &= \mu_{Mi_a1_pn_{i,p}, \text{durchführbar}} \\
 d_{i_{21}} &= \mu_{Mi_a2_p1, \text{durchführbar}} \\
 &\vdots \\
 d_{i_{n_{i,\alpha}n_{i,p}}} &= \mu_{Mi_an_{i,\alpha}_pn_{i,p}, \text{durchführbar}}
 \end{aligned} \tag{6.2}$$

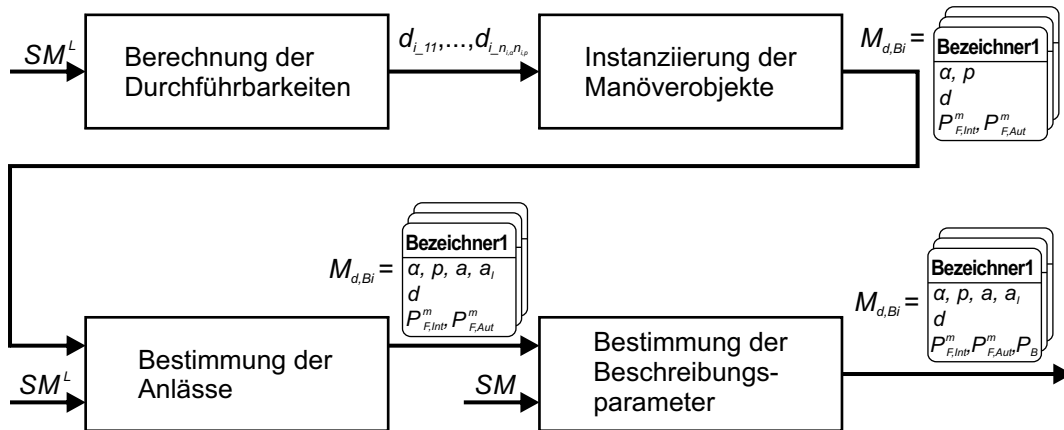


Abbildung 6.4: Bestimmung der durchführbaren Manöver $M_{d,Bi}$ eines mit dem Manöverbegriff Bi bezeichneten Manövers

Nach der Berechnung der Durchführbarkeiten des Manövers erfolgt die Instanziierung der neuen Manöverobjekte dessen spezialisierter Manöverklasse. Ist das Manöver mit einer bestimmten Kombination von Ausprägung und Phase durchführbar ($d > d_{min}$), wird ein neues Manöverobjekt mit dieser Belegung der Attribute instanziiert.

Für die Bestimmung der Anlässe werden ebenfalls linguistische Regeln eingesetzt. Für jeden für ein Manöver definierten Anlass erfolgt die Nutzung einer linguistischen Regel. Die Erfülltheit der

Konklusion einer Regel ergibt direkt die Intensität des jeweiligen Anlasses. Sind für ein Manöver mehrere Anlässe modelliert, so wird derjenige mit der höchsten Intensität verwendet. In den Manöverobjekten werden als Ergebnis dieses Schrittes der Anlass des Manövers a und die Intensität des Anlasses a_I gesetzt. Die Umsetzung der Bestimmung des Anlasses erfolgt in der Operation *Bestimme Anlass* der spezialisierten Manöverklassen.

Abschließend werden für die einzelnen durchführbaren Manöver unter Nutzung der Situationsmerkmale die Beschreibungsparameter P_B ermittelt. Für diesen Schritt wird die Operation *Bestimme Beschreibungsparameter* der spezialisierten Manöverklassen verwendet.

6.1.2.2 Formulierung der linguistischen Regeln zur Bestimmung der Durchführbarkeiten

Nach der Beschreibung der Vorgehensweise zur Berechnung der Durchführbarkeiten wird im Folgenden anhand der Betrachtung der Anforderungen die Systematik zur Formulierung der linguistischen Regeln erläutert. Die Anforderungen ergeben sich unter Berücksichtigung der Definition eines durchführbaren Manövers (siehe Definition 4.2) sowohl aus dem Gesamtkonzept der manöverbasierten Umsetzung der kooperativen Automation (siehe Kapitel 5) als auch aus den umzusetzenden Kooperation ausmachenden Elementen (siehe Kapitel 3.2). Dieses sind insbesondere die Elemente gemeinsame Handlungsplanung, gemeinsame Handlungsausführung und Kompatibilität. Die Erläuterung der Anforderungen erfolgt aus den Perspektiven der manöverbasierten Umsetzung der kooperativen Automation sowie den genannten Kooperation ausmachenden Elementen.

Im Gesamtkonzept der manöverbasierten Umsetzung der kooperativen Automation nimmt die Bestimmung der Durchführbarkeiten eine zentrale Stellung ein (siehe Kapitel 5.1.2 und 5.3). Da für die als durchführbar bestimmten Manöver die weitere Handlungsgenerierung in der kooperativen Automation erfolgt, wird durch die Bestimmung der Durchführbarkeiten die Handlungsgenerierung gesteuert. Eine linguistische Regel ist somit für die Steuerung der Handlungsgenerierung für ein Manöver mit einer bestimmten Ausprägung und Phase verantwortlich. Gliedert sich ein Manöverablauf in mehrere Phasen, so muss durch die einzelnen linguistischen Regeln die Ablaufsteuerung der Phasen so realisiert werden, dass sich kontinuierliche Phasenübergänge ergeben. Damit resultieren die folgenden konkreten Anforderungen an eine einer Phase und Ausprägung eines Manövers zugehörige linguistische Regel: Durch die Regel ist zu erkennen, ob es möglich ist, die Manöverausführung mit dieser Phase und Ausprägung zu beginnen. Des Weiteren ist durch die Regel zu erkennen, ob es während der bereits laufenden Ausführung möglich ist, die Ausführung dieses Manövers mit dieser Phase und Ausprägung fortzusetzen. In diesen Fällen muss als Ergebnis der Anwendung der linguistischen Regel eine Durchführbarkeit $d > 0$ resultieren. Umgekehrt muss durch die Regel die Erkennung gewährleistet sein, ob die Ausführung eines Manövers mit einer bestimmten Phase und Ausprägung beendet werden muss. Als Ursachen für die Beendigung muss ein normaler Manöverabschluss sowie ein Abbruch berücksichtigt werden, der zum Beispiel aufgrund eines Fahrereingriffs in die Fahrzeugsteuerung im Rahmen der gemeinsamen Handlungsausführung notwendig wird. In diesen Fällen muss aus der Anwendung der linguistischen Regel eine Durchführbarkeit von $d = 0$ resultieren.

Die Umsetzung des Kooperation ausmachenden Elementes gemeinsame Handlungsplanung erfordert die Bestimmung sämtlicher in einer Situation durchführbaren Manöver (siehe Kapitel 3.2.2

und 4.1). Es soll jederzeit eine vor dem Hintergrund der Automationsfähigkeiten größtmögliche Menge an durchführbaren Manövern von der Automation als Grundlage der Verhandlung mit dem Fahrer im Rahmen der gemeinsamen Manöverplanung angeboten werden. Um dies zu gewährleisten ergeben sich die folgenden konkreten Anforderungen an eine Regel: In die Prämisse einer Regel dürfen ausschließlich die aktuelle Situation sowie die Situationshistorie einbezogen werden. Es dürfen zum Beispiel keine Abhängigkeiten zu vorher ausgeführten Manövern, Phasen von Manövern oder anderen internen Manöverzuständen sowie Manöverablaufgraden eingebracht werden. Aufgrund der gemeinsamen Handlungsausführung, die eine im Detail unbekannte Fahrereinwirkung auf die Fahrzeugsteuerung bewirken kann, kann nicht davon ausgegangen werden, dass von der Automation geplante Manöverabläufe auch vom Fahrzeug ausgeführt werden. Daher könnten Abhängigkeiten zu vorher ausgeführten Manövern, Manöverphasen, internen Manöverzuständen oder Manöverablaufgraden in der Prämisse zu einer Feststellung der Nichtdurchführbarkeit führen, obwohl das Manöver für die Automation eigentlich durchführbar wäre. Hinsichtlich der Manöverphasen ergibt sich hier die Anforderung, jederzeit in die Ausführung einer durchführbaren Phase eines Manövers einsteigen können zu müssen, ohne vorherige Phasen absolviert haben zu müssen. Das jederzeitige Zurverfügungstellen einer größtmöglichen Menge an durchführbaren Manövern ist auch aufgrund der Möglichkeit des Fahrers, im Rahmen der gemeinsamen Handlungsplanung durch explizite Kommunikation eine Manöverausführung jederzeit abubrechen, notwendig. Nach dem Abbruch soll in der folgenden gemeinsamen Manöverplanung mit dem Fahrer wiederum eine größtmögliche Menge an durchführbaren Manövern von der Automation als Grundlage der Verhandlung angeboten werden, um gemeinsam einen bestmöglichen Manöverplan zur Fortsetzung der Fahrt entwickeln zu können. Somit ist es für den Fahrer möglich, die Automation jederzeit zur Ausführung eines anderen Manövers zu bewegen, das eine höhere gemeinsame Präferenz aufweist. Die in den vorhergehenden Absätzen formulierten Gedanken lassen sich zur folgenden Systematik zur Formulierung der Prämissen der linguistischen Regeln zusammenfassen: In der Prämisse einer linguistischen Regel erfolgt die Definition eines Situationsraumes, in dem ein Manöver mit einer bestimmten Phase und Ausprägung durchführbar ist. Dazu basiert die Prämisse ausschließlich auf Merkmalen der aktuellen Situation sowie Merkmalen der Situationshistorie. Die Durchführbarkeit muss dabei während des gesamten Ablaufes einer bestimmten Phase und Ausprägung eines Manövers festgestellt werden.

Abschließend einige Überlegungen zur Erreichung einer kompatiblen Bewertung der Durchführbarkeit und damit einer kompatiblen Formulierung der linguistischen Regeln: Die Beachtung der Kompatibilitätsforderung muss zunächst bei der Auswahl der Situationsmerkmale erfolgen, die Bestandteile der Prämisse sind. Des Weiteren muss eine Beachtung bei der darauf aufbauenden Festlegung von Wertebereichen für diese Situationsmerkmale, in denen das Manöver mit dieser Ausprägung und Phase durchführbar ist, erfolgen. Um diese beiden Schritte durchzuführen, wird jeweils das in Kapitel 4.4 beschriebene Vorgehen zur Erreichung kompatibler Ziele, Werte und Methoden angewendet. Zusammenfassend lässt sich für die Kompatibilität festhalten, dass durch die Prämisse ein kompatibler Situationsraum zu definieren ist, in dem das Manöver durchführbar ist. Ein Beispiel für die konkrete Definition kompatibler Regeln zur Bestimmung der Durchführbarkeiten wird in Kapitel 7.3.2 anhand des Manövers „Fahrstreifen wechseln“ gegeben.

6.1.3 Bestimmung der Valentiale der durchführbaren Manöver

Die durchführbaren Manöver $M_{\text{durchführbar}}$ bilden, wie Abbildung 6.3 zeigt, die Menge der Manöver, für die Valentiale berechnet werden (zur Definition des Valentiales siehe Kapitel 4.1). Zunächst wird für jedes der $n_{\text{durchführbar}}$ Manöver der relative Wert des Manövers w_{rel} bezüglich aller anderen in der Menge $M_{\text{durchführbar}}$ enthaltenen Manöver bestimmt (siehe Abbildung 6.5). Für die Ermittlung von w_{rel} werden neben den Manöverobjekten die unter Berücksichtigung der Fahrstilparameter fuzzifizierten linguistischen Situationsmerkmale SM^L genutzt. Basierend auf w_{rel} kann anschließend die Berechnung des Valentiales v für jedes durchführbare Manöver erfolgen. Die Implementierung des in diesem Abschnitt vorgestellten Ansatzes erfolgt in der manöverbasierten Umsetzung der kooperativen Automation in der Operation *Berechne Valentiale* der Manövermenge (siehe Kapitel 5.2 und 5.3).

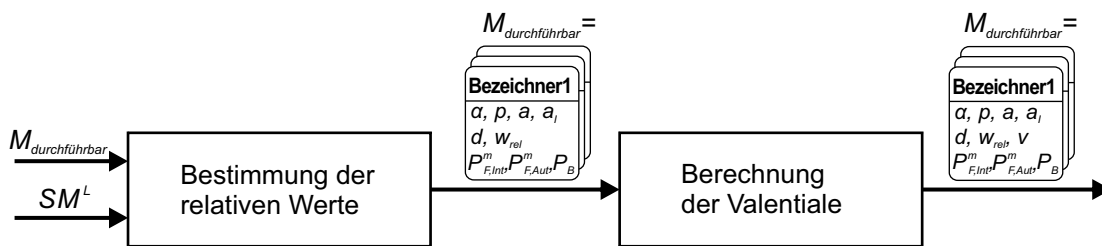


Abbildung 6.5: Bestimmung der Valentiale der durchführbaren Manöver

Die Bestimmung der relativen Werte der Manöver basiert auf Paarvergleichen mittels linguistischer Aussagen zwischen allen durchführbaren Manövern unter Berücksichtigung der Ziele der Automation. Ein Paarvergleich legt für ein Manöverpaar fest, welches der beiden Manöver situationsabhängig präferiert wird. Damit bietet die Modellierung mit Hilfe von Paarvergleichen eine gute Möglichkeit, bei der Gestaltung des Automationsverhaltens gezielt das Entscheidungsverhalten der Automation in einer bestimmten Situation einzustellen. Um die relativen Werte zu erhalten, werden die Ergebnisse der Paarvergleiche in einer Matrix abgelegt, die dann mit einer Eigenvektormethode gelöst wird (nach Wang et al. [203]). Im Folgenden wird dieses Verfahren detailliert beschrieben. Ein Paarvergleich muss für Paare von Manövern definiert werden, bei denen die Möglichkeit besteht, dass beide Manöver in einer Situation durchführbar sind. Dabei müssen die verschiedenen möglichen Belegungen der Ausprägungen und Phasen ebenfalls mit betrachtet werden. Konkret bedeutet dies, dass Situationen existieren, in denen $d_{M1} \geq d_{\min}$ und $d_{M2} \geq d_{\min}$ ist. Bei den Manövern „Fahrstreifen wechseln“ (zum Beispiel mit der Ausprägung „nach links“) und „Fahrstreifen folgen“ trifft diese Bedingung zu. Folgt das Eigenfahrzeug auf einer Straße mit mehreren Fahrstreifen und ohne Verkehr einem der Fahrstreifen, sind beide Manöver durchführbar. Daher muss für die Manöver „Fahrstreifen wechseln“ und „Fahrstreifen folgen“ ein Paarvergleich definiert werden. Die Manöver „Stillstehen“ und „Notbremsen“ sind aufgrund ihrer Definition (siehe Kapitel 5.1.3) nicht in einer Situation durchführbar. Befindet sich das Eigenfahrzeug im Stillstand, so kann kein Notbremsmanöver durchgeführt werden. Ist es in Bewegung, so kann es nicht im Stillstand verharren. Es muss somit für diese beiden Manöver kein Paarvergleich definiert werden.

Zur Beschreibung eines Paarvergleichs dienen zwei linguistische Bevorzugungsregeln. Für die beiden beispielhaften Manöver $M1$ und $M2$ lauten diese Bevorzugungsregeln R1-2_b und R2-1_b:

$$\begin{aligned} R1-2_b: & \text{ WENN ... DANN } w_{2,1}^L \text{ M1_bevorzugt_vor_M2} \\ R2-1_b: & \text{ WENN ... DANN } w_{2,1}^L \text{ M2_bevorzugt_vor_M1} \end{aligned}$$

Jeweils eine linguistische Bevorzugungsregel beschreibt eine Konstellation von linguistischen Werten, in der das eine Manöver dem anderen bevorzugt wird. Die Prämissen der beiden Bevorzugungsregeln $R1-2_b$ und $R2-1_b$ sind unabhängig voneinander formuliert. Dadurch lassen sich gezielt Konstellationen beschreiben, in denen das eine Manöver dem anderen bevorzugt wird, ohne dass ein Nichtzutreffen direkt eine umgekehrte Bevorzugung impliziert. Die Konklusion der Regeln bildet die linguistische Variable $w_{2,1}^L$, die linguistisch den relativen Wert von Manöver 2 bezüglich Manöver 1 beschreibt. Der linguistische Wert M1_beforzugt_vor_M2 bedeutet, dass Manöver 1 dem Manöver 2 bevorzugt wird. Der linguistische Wert M2_beforzugt_vor_M1 bedeutet, dass Manöver 2 dem Manöver 1 bevorzugt wird.

Die Prämissen der Regeln setzen sich aus den explizit formulierten Zielen der Automation G , den linguistischen Situationsmerkmalen SM^L sowie den Anlässen a und deren Intensitäten a_I der betreffenden Manöver zusammen. Durch die linguistischen Situationsmerkmale wird ein Bezug der Entscheidung zur betrachteten Situation hergestellt. Die Berücksichtigung des Anlasses ermöglicht die gezielte Bevorzugung eines Manövers, wenn ein dies begründender Anlass vorliegt. Die Intensität des Anlasses bewirkt dabei die Stärke der Bevorzugung des Manövers.

Durch die explizite Formulierung von Zielen in den Prämissen lässt sich in den Bevorzugungsregeln gezielt die Entscheidung formulieren, welches der beiden Manöver zur Erfüllung eines Ziels gewählt wird. Somit erfolgt mittels der Regeln eine direkte Verknüpfung der Ziele mit den Manövern, die der Erfüllung der Ziele dienen. Die kompatibel zu möglichen Zielen eines Fahrers in der kooperativen Automation berücksichtigten Ziele sind (siehe auch Kapitel 4.4):

1. Präferierte Geschwindigkeit halten / erreichen: $g_{\text{Geschwindigkeit}} \in [0, 1]$
2. Verkehrsregeln beachten: $g_{\text{Verkehrsregeln}} \in [0, 1]$
3. Bewegungszustand halten / Wechsel des Zustands möglichst klein halten:
 $g_{\text{Bewegungszustand}} \in [0, 1]$
4. Gefährdung minimal halten / minimieren: $g_{\text{Gefährdung}} \in [0, 1]$
5. Routenvorgabe umsetzen: $g_{\text{Route}} \in [0, 1]$

Über den jeweiligen Gewichtungsfaktor (zum Beispiel $g_{\text{Geschwindigkeit}}$) ist die Wichtigkeit eines Zieles gegenüber den anderen Zielen einstellbar. Unter anderem aufgrund der Produkthaftung muss ein vorsätzlicher Verstoß der Automation gegen die Verkehrsregeln oder eine Inkaufnahme einer vermeidbaren Gefährdung zugunsten eines anderen Zieles unbedingt ausgeschlossen werden. Daher müssen die Gewichtungsfaktoren $g_{\text{Verkehrsregeln}}$ und $g_{\text{Gefährdung}}$ auf den Wert 1 gesetzt werden. Um den relativen Wert von Manöver 2 bezüglich Manöver 1 $w_{2,1}$ ($w_{2,1} \in [0, 1]$) zu bestimmen und damit die beiden unabhängigen Bevorzugungsgrade (M1_beforzugt_vor_M2, M2_beforzugt_vor_M1) zusammenzuführen, muss die linguistische Variable $w_{2,1}^L$ defuzzifiziert werden. Die

Zugehörigkeitsfunktionen der beiden linguistischen Werte $M1_bevorzugt_vor_M2$ und $M2_bevorzugt_vor_M1$ sind Singletons (siehe Abbildung 6.6). Ein Singleton ist eine Menge, die genau ein Element der Grundmenge mit einem bestimmten Zugehörigkeitsgrad enthält. Die beiden linguistischen Werte $M1_bevorzugt_vor_M2$ und $M2_bevorzugt_vor_M1$ enthalten daher jeweils ein Element der Definitionsmenge des relativen Wertes $w_{2,1}$. $w_{2,1}$ ($w_{2,1} \in [0, 1]$) beschreibt den relativen Wert von Manöver 2 bezüglich Manöver 1, $w_{1,2}$ ($w_{1,2} \in [0, 1]$) den relativen Wert von Manöver 1 bezüglich Manöver 2. Es gilt der Zusammenhang:

$$w_{1,2} = 1 - w_{2,1} \quad (6.3)$$

Die Bedeutungen der relativen Werte $w_{2,1}$ und $w_{1,2}$ sind nach Tabelle 6.3 definiert.

Bedeutung	$w_{2,1}$	$w_{1,2}$
Manöver 1 hat den höheren Wert bezüglich Manöver 2	$0 \leq w_{2,1} < 0,5$	$0,5 < w_{1,2} \leq 1$
Manöver 1 und Manöver 2 sind relativ zueinander gleichwertig	$w_{2,1} = 0,5$	$w_{1,2} = 0,5$
Manöver 2 hat den höheren Wert bezüglich Manöver 1	$0,5 < w_{2,1} \leq 1$	$0 \leq w_{1,2} < 0,5$

Tabelle 6.3: Bedeutung der relativen Werte $w_{2,1}$ und $w_{1,2}$

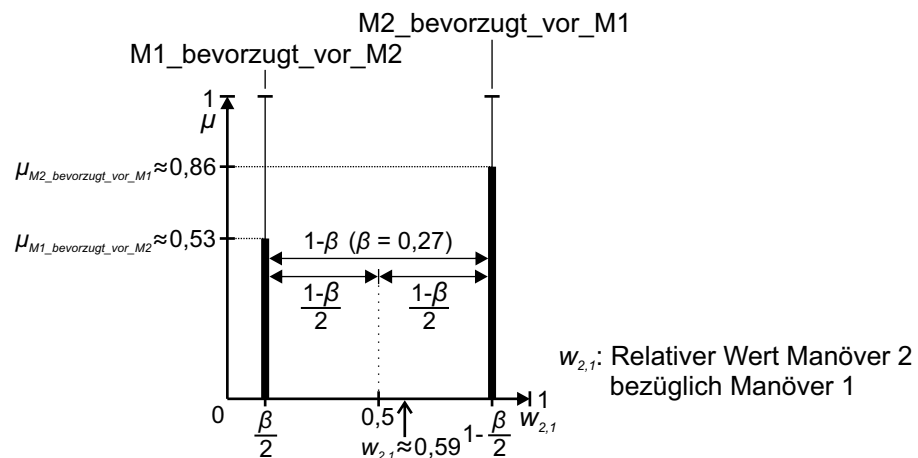


Abbildung 6.6: Zugehörigkeitsfunktionen des relativen Wertes von Manöver 2 bezüglich Manöver 1 und Defuzzifizierung anhand eines Zahlenbeispiels

Für die Defuzzifizierung von $w_{2,1}^L$ wird die Schwerpunktmethode für Singletons (siehe zum Beispiel Unbehauen [198]) eingesetzt. Diese lautet allgemein (defuzzifizierter Wert y , Zugehörigkeitsgrade μ zu den n Singletons an den Stellen y_i):

$$y = \frac{\sum_{i=1}^n y_i \cdot \mu(y_i)}{\sum_{i=1}^n \mu(y_i)} \quad (6.4)$$

Für $w_{2,1}^L$ sind die Zugehörigkeitsgrade $\mu_{M1_bevorzugt_vor_M2}$ und $\mu_{M2_bevorzugt_vor_M1}$ zu den linguistischen Werten $M1_bevorzugt_vor_M2$ und $M2_bevorzugt_vor_M1$ (siehe Abbildung 6.6). Bei

Anwendung der Schwerpunktmethod für Singletons ergibt sich Gleichung 6.5 zur Bestimmung von $w_{2,1}$. Der relative Wert $w_{1,2}$ ergibt sich nach Gleichung 6.3.

$$w_{2,1} = \frac{\frac{\beta}{2} \cdot \mu_{M1_bevorzugt_vor_M2} + \left(1 - \frac{\beta}{2}\right) \cdot \mu_{M2_bevorzugt_vor_M1}}{\mu_{M1_bevorzugt_vor_M2} + \mu_{M2_bevorzugt_vor_M1}} \quad (6.5)$$

In Gleichung 6.5 findet sich außerdem die Modellierung der Verhandlungsbereitschaft β der Automation. Je nach Einstellung der Verhandlungsbereitschaft β ist es möglich, einen deutlichen oder weniger deutlichen Unterschied in den relativen Werten der beiden Manöver zu erzeugen. Je größer der Unterschied der relativen Werte ist, desto stärker hat die Automation den Willen, das eine Manöver auszuführen sowie das andere nicht auszuführen. Die dadurch hervorgerufenen Unterschiede in den berechneten Valentialen der Manöver bilden die Grundlage für den Ausdruck des Automationswillens in der Verhandlung mit dem Fahrer über das auszuführende Manöver.

Durch die Verhandlungsbereitschaft β ($\beta \in [0, 1]$) wird die Position der beiden Singletons auf der Achse $w_{2,1}$ vorgegeben (siehe Abbildung 6.6). Dadurch bestimmt sich, welches Element aus der Definitionsmenge des relativen Wertes in den jeweiligen durch die linguistischen Werte $M1_bevorzugt_vor_M2$ und $M2_bevorzugt_vor_M1$ beschriebenen Mengen enthalten ist. Die beiden Singletons liegen symmetrisch zu einer durch $w_{2,1} = 0,5$ verlaufenden senkrechten Geraden mit einem Abstand von $1 - \beta$ zueinander. Da $w_{1,2} = 1 - w_{2,1}$ beschreibt β somit die maximal mögliche Differenz von $w_{2,1}$ und $w_{1,2}$. Die durch den linguistischen Wert $M1_bevorzugt_vor_M2$ beschriebene Menge enthält das Element $\frac{\beta}{2}$ aus der Definitionsmenge des relativen Wertes $w_{2,1}$, die durch den linguistischen Wert $M1_bevorzugt_vor_M2$ beschriebene Menge das Element $1 - \frac{\beta}{2}$.

Bei der minimalen Verhandlungsbereitschaft $\beta = 0$ befinden sich die Singletons bei $w_{2,1} = 0$ und $w_{2,1} = 1$. Damit ist die maximale Differenz der relativen Werte $|w_{2,1} - w_{1,2}| = 1$. Durch ein größeres β wird die maximale Differenz kleiner und der Automationswille prägt sich weniger deutlich aus. Es wird einfacher, die Automation von der Ausführung des weniger bevorzugten Manövers zu überzeugen. Bei $\beta = 1$ erhalten beide Manöver den gleichen relativen Wert 0,5 und die Automation kann eine Bevorzugung nicht mehr ausdrücken. Für die Auswahl eines Manövers wäre sie dann auf Eingaben des Fahrers angewiesen.

Bei dem in Abbildung 6.6 gezeigten Zahlenbeispiel ergibt sich der relative Wert $w_{2,1} \approx 0,59$ durch die Defuzzifizierung von $w_{2,1}^L$ unter der Anwendung von Gleichung 6.5. Dabei sind die Zugehörigkeitsgrade zu den linguistischen Werten $M1_bevorzugt_vor_M2$ und $M2_bevorzugt_vor_M1$ $\mu_{M1_bevorzugt_vor_M2} \approx 0,53$ und $\mu_{M2_bevorzugt_vor_M1} \approx 0,86$. Für die Verhandlungsbereitschaft wurde beispielhaft $\beta = 0,27$ gewählt.

Mittels der beschriebenen Methode werden $\frac{(n_{\text{durchführbar}} \cdot n_{\text{durchführbar}}) - n_{\text{durchführbar}}}{2}$ Paarvergleiche für alle möglichen Paarungen der in der Menge $M_{\text{durchführbar}}$ enthaltenen Manöver durchgeführt. Es ergeben sich damit $(n_{\text{durchführbar}} \cdot n_{\text{durchführbar}}) - n_{\text{durchführbar}}$ relative Werte. Diese relativen Werte beschreiben jeweils den relativen Wert eines durchführbaren Manövers bezüglich eines anderen durchführbaren Manövers. Um diese auf Manöverpaare bezogenen relativen Werte zu einem relativen Wert w_{rel} für jedes durchführbare Manöver bezüglich aller in der Menge $M_{\text{durchführbar}}$ enthaltenen Manöver zusammenzuführen, wird die von Wang et al. [203] vorgestellte Methode genutzt.

Die Ergebnisse der Paarvergleiche werden dazu in die Wertematrix W (siehe Gleichung 6.6) eingefügt. Die Matrix beschreibt den vollständigen Paarvergleich unter allen durchführbaren Manövern. Sie enthält daher die gesamten $(n_{\text{durchführbar}} \cdot n_{\text{durchführbar}}) - n_{\text{durchführbar}}$ auf die enthaltenen Manöverpaare bezogenen relativen Werte. Zur Auflösung werden zunächst die Summen der Reihen der Matrix gebildet und diese auf der Diagonalen angeordnet:

$$W = \begin{bmatrix} \sum_{j=2}^n w_{1,j} & w_{1,2} & \cdots & w_{1,n_{\text{durchführbar}}} \\ w_{2,1} & \sum_{j=1, j \neq 2}^{n_{\text{durchführbar}}} w_{2,j} & \cdots & w_{2,n_{\text{durchführbar}}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ w_{n_{\text{durchführbar}},1} & w_{n_{\text{durchführbar}},2} & \cdots & \sum_{j=1}^{n_{\text{durchführbar}}} w_{n_{\text{durchführbar}},j} \end{bmatrix} \quad (6.6)$$

Die relativen Werte der einzelnen durchführbaren Manöver bezüglich aller in der Menge $M_{\text{durchführbar}}$ enthaltenen Manöver $w_{\text{rel},1} \dots w_{\text{rel},n_{\text{durchführbar}}}$ werden durch die Bestimmung des zum größten Eigenwert λ_{max} der Matrix W gehörenden Rechtseigenvektors \mathbf{w}_{rel} nach Gleichung 6.7 bestimmt. Dabei sind die Elemente des Eigenvektors \mathbf{w}_{rel} die relativen Werte $w_{\text{rel},1} \dots w_{\text{rel},n_{\text{durchführbar}}}$. Zur Lösung des Eigenwertproblems wird eine in Wang et al. [203] beschriebene numerische Methode genutzt.

$$W \cdot \mathbf{w}_{\text{rel}} = \lambda_{\text{max}} \cdot \mathbf{w}_{\text{rel}} \quad (6.7)$$

Das Valential der durchführbaren Manöver kann nun aus der Durchführbarkeit und dem relativen Wert des Manövers bestimmt werden (siehe auch Abbildung 6.5). Dazu wird die in Kapitel 4.1 eingeführte Gleichung 4.2 zur Bestimmung des Valentiales angewandt. Es ergibt sich:

$$\begin{aligned} v_1 &= \min(d_1 + r, 1) \cdot w_{\text{rel},1} \\ v_2 &= \min(d_2 + r, 1) \cdot w_{\text{rel},2} \\ \vdots &\quad \quad \quad \vdots \\ v_{n_{\text{durchführbar}}} &= \min(d_{n_{\text{durchführbar}}} + r, 1) \cdot w_{\text{rel},n_{\text{durchführbar}}} \end{aligned} \quad (6.8)$$

Mittels der Risikobereitschaft r wird, wie in Kapitel 4.1 beschrieben, die Einflussstärke der Durchführbarkeit auf das Valential eingestellt. Je niedriger die Risikobereitschaft ist, desto größer ist der Einfluss der Durchführbarkeit. Abbildung 4.1 zeigt dreidimensionale Visualisierungen des Valentiales in Abhängigkeit der Durchführbarkeit und des relativen Wertes mit zwei unterschiedlichen Risikobereitschaften.

Als Ergebnis des Schrittes „Bestimmung der Valentiale“ zum Aufbau des Manöverbaumes sind bei den in der Menge $M_{\text{durchführbar}}$ enthaltenen Manöverobjekten der relative Wert w_{rel} und das Valential v gesetzt.

6.1.4 Erkennung des wahrscheinlich aktuell vom Fahrzeug gefahrenen Manövers

Parallel zur Bestimmung der durchführbaren Manöver und ihrer Valentiale erfolgt, wie Abbildung 6.3 zeigt, die Erkennung des wahrscheinlich aktuell vom Fahrzeug gefahrenen Manövers. Um das wahrscheinlich aktuell vom Fahrzeug gefahrene Manöver (siehe Definition 4.4) zu finden, werden für jedes verfügbare Manöver unter Berücksichtigung der jeweiligen Ausprägungen und Phasen zunächst die Wahrscheinlichkeiten w_{aktuell} berechnet. w_{aktuell} ist als die Wahrscheinlichkeit definiert, mit der ein Manöver als aktuell gefahrenes Manöver infrage kommt. Das Manöver, das die höchste Wahrscheinlichkeit aufweist, wird als das wahrscheinlich aktuell vom Fahrzeug gefahrene Manöver m_{aktuell} ausgewählt. Abbildung 6.7 zeigt die einzelnen Schritte der im Weiteren vorgestellten Vorgehensweise. Im Rahmen der manöverbasierten Umsetzung der kooperativen Automation ist diese in der Operation *Erzeuge wahrscheinlich aktuell gefahrenes Manöver* der Manövermenge realisiert (siehe Kapitel 5.2).

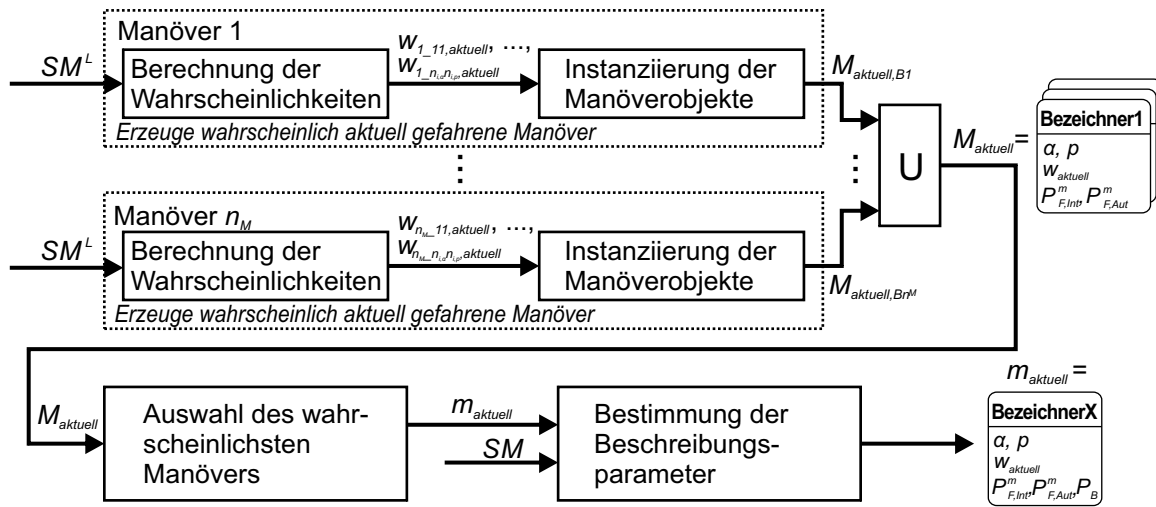


Abbildung 6.7: Erkennung des wahrscheinlich aktuell vom Fahrzeug gefahrenen Manövers

Die Berechnung der einzelnen Wahrscheinlichkeiten $w_{i_11,aktuell} \dots w_{i_{n_i, \alpha} n_i, p, aktuell}$ eines Manövers i für jede mögliche Kombination von Ausprägung und Phase ist in dessen spezialisierter Manöverklasse in der Operation *Erzeuge wahrscheinlich aktuell gefahrene Manöver* umgesetzt (siehe Kapitel 5.1.2). Diese Operation instanziiert neue Manöverobjekte dieser spezialisierten Manöverklasse mit den Kombinationen von Ausprägung und Phase, deren Wahrscheinlichkeit $w_{i_{xy}, aktuell}$ größer als $w_{aktuell, min}$ ist. Diese Manöverobjekte bilden die Manövermenge $M_{aktuell, Bi}$.

Zur Laufzeit der manöverbasierten Umsetzung liegt eine Instanz jeder spezialisierten Manöverklasse als Basismanöverobjekt in der Manöverbasismenge vor. Die Operation *Erzeuge wahrscheinlich aktuell gefahrene Manöver* der Manövermenge ruft die Operationen *Erzeuge wahrscheinlich aktuell gefahrene Manöver* der Basismanöverobjekte auf. Wie Abbildung 6.7 zeigt, werden damit für die n_M verfügbaren Manöver von den jeweiligen Operationen *Erzeuge wahrscheinlich aktuell gefahrene Manöver* der Basismanöverobjekte die Manövermengen $M_{aktuell, B1} \dots M_{aktuell, Bn_M}$ erzeugt. Die Vereinigung dieser Manövermengen bildet die Menge der wahrscheinlich gefahrenen Manöver $M_{aktuell}$.

Als aktuell gefahrenes Manöver m_{aktuell} wird das Manöver aus M_{aktuell} ausgewählt, das die höchste Wahrscheinlichkeit w_{aktuell} aufweist. Wird kein Manöver erkannt, so wird als Ergebnis ein unbekanntes Manöver ausgegeben. Abschließend werden auf Basis der Situationsmerkmale die Beschreibungsparameter P_B des aktuellen Manövers bestimmt. Für die Bestimmung der Beschreibungsparameter erfolgt die Nutzung der im Manöverobjekt m_{aktuell} enthaltenen Operation *Bestimme Beschreibungsparameter*.

Nachdem die gesamte Vorgehensweise zur Bestimmung von m_{aktuell} vorgestellt wurde, erfolgt nun die Darstellung der Berechnung der Wahrscheinlichkeiten $w_{i_1,1,\text{aktuell}} \dots w_{i_{n_i,\alpha}n_{i,p},\text{aktuell}}$ eines Manövers i . Da die Berechnung der Wahrscheinlichkeiten auf der Methode der Fuzzy Logik basiert, dienen die unter Berücksichtigung der Fahrstilparameter fuzzifizierten linguistischen Situationsmerkmale SM^L als Eingangswerte. Es werden keine Fahrereingaben berücksichtigt. Um die Wahrscheinlichkeit des Manövers mit einer bestimmten Ausprägung und Phase zu bestimmen, wird jeweils eine unabhängige linguistische Regel verwendet. Damit ergeben sich für ein im System vorhandenes Manöver $n_{i,a} \cdot n_{i,p}$ linguistische Regeln. Die Regelbasis zur Bestimmung der Wahrscheinlichkeiten für ein Manöver i ist wie folgt definiert:

$$\begin{aligned}
 R-i_{11}_a: & \text{ WENN ... DANN } Mi_a1_p1^L \text{ aktuell_gefahren} \\
 R-i_{12}_a: & \text{ WENN ... DANN } Mi_a1_p2^L \text{ aktuell_gefahren} \\
 & \vdots \\
 R-i_{1n_{i,p}}_a: & \text{ WENN ... DANN } Mi_a1_pn_{i,p}^L \text{ aktuell_gefahren} \\
 R-i_{21}_a: & \text{ WENN ... DANN } Mi_a2_p1^L \text{ aktuell_gefahren} \\
 & \vdots \\
 R-i_{n_{i,\alpha}n_{i,p}}_a: & \text{ WENN ... DANN } Mi_an_{i,\alpha}_pn_{i,p}^L \text{ aktuell_gefahren}
 \end{aligned}$$

Die Erfüllung der Konklusion einer Regel modelliert direkt die Wahrscheinlichkeit w_{aktuell} , mit der das jeweilige Manöver mit der durch die Regel adressierten Ausprägung und Phase als aktuell gefahrenes Manöver infrage kommt. Da somit keine Defuzzifizierung notwendig ist, ergeben sich die Wahrscheinlichkeiten $w_{i_1,1,\text{aktuell}} \dots w_{i_{n_i,\alpha}n_{i,p},\text{aktuell}}$ aus der Erfüllung der linguistischen Werte „aktuell_gefahren“ der linguistischen Variablen $Mi_a1_p1 \dots Mi_an_{i,\alpha}_pn_{i,p}$:

$$\begin{aligned}
 w_{i_1,1,\text{aktuell}} &= \mu_{Mi_a1_p1,\text{aktuell_gefahren}} \\
 w_{i_1,2,\text{aktuell}} &= \mu_{Mi_a1_p2,\text{aktuell_gefahren}} \\
 &\vdots \\
 w_{i_{1n_{i,p}},\text{aktuell}} &= \mu_{Mi_a1_pn_{i,p},\text{aktuell_gefahren}} \\
 w_{i_{21},\text{aktuell}} &= \mu_{Mi_a2_p1,\text{aktuell_gefahren}} \\
 &\vdots \\
 w_{i_{n_{i,\alpha}n_{i,p}},\text{aktuell}} &= \mu_{Mi_an_{i,\alpha}_pn_{i,p},\text{aktuell_gefahren}}
 \end{aligned} \tag{6.9}$$

Wie bereits erläutert wurde, können daraufhin im nächsten Schritt die neuen Manöverobjekte der spezialisierten Manöverklasse dieses Manövers erzeugt werden, um damit die Manövermenge $M_{\text{aktuell},Bi}$ zu bilden.

6.1.5 Zusammensetzen des Manöverbaumes

Nachdem die Menge der durchführbaren Manöver $M_{\text{durchführbar}}$ sowie das wahrscheinlich aktuell vom Fahrzeug gefahrene Manöver m_{aktuell} bestimmt wurden, kann der Manöverbaum der Automation $M_{\text{Automation}}$ zusammengesetzt werden (siehe auch Abbildung 6.3). Neben dem Zusammensetzen des im aktuellen Rechenzyklus neu erstellten Manöverbaumes $M_{\text{Automation}}$ aus $M_{\text{durchführbar}}$ und m_{aktuell} erfolgt in diesem Rahmen außerdem die Gewährleistung der Kontinuität in der Handlungsgenerierung. Dazu wird $M_{\text{Automation}}$ mit dem im letzten Rechenzyklus aufgebauten Manöverbaum $M_{\text{Automation,alt}}$ zusammengeführt. Abbildung 6.8 zeigt die für das Zusammensetzen entworfene Vorgehensweise. Im Rahmen der manöverbasierten Umsetzung der kooperativen Automation erfolgt die Realisierung dieser Vorgehensweise in der Operation *Setze Baum zusammen* des Manöverbaumes (siehe Kapitel 5.2).

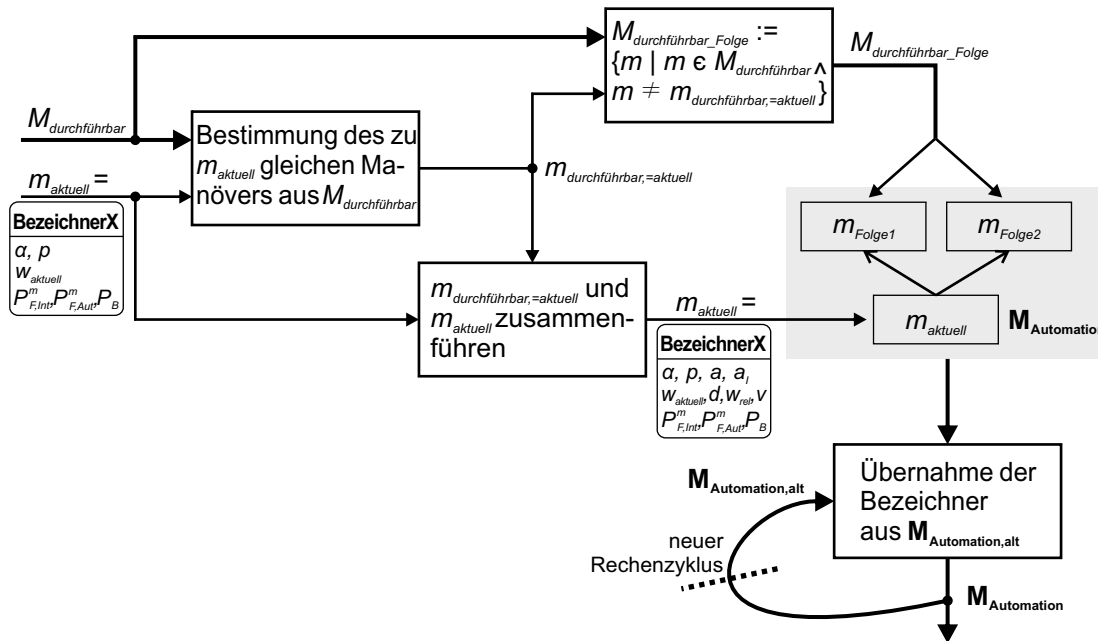


Abbildung 6.8: Zusammensetzen des Manöverbaumes $M_{\text{Automation}}$

Wie in Kapitel 4.3 beschrieben wurde, ist das Wurzelmanöver des Manöverbaumes das aktuell vom Fahrzeug gefahrene Manöver, welches mit einem Valential bewertet ist. Ist das Valential dieses Manövers $v > 0$, kann es von der Automation weiter ausgeführt werden. Das Manöver m_{aktuell} kann nicht direkt als Wurzelmanöver verwendet werden, da es nicht mit einem Valential bewertet ist. Um ein Valential zuordnen zu können, wird aus der Menge $M_{\text{durchführbar}}$ das zu m_{aktuell} gleiche Manöver gesucht. Wenn m_{aktuell} für die Automation weiter durchführbar ist, ist es auch in der Menge $M_{\text{durchführbar}}$ enthalten, da in dieser Menge sämtliche für die Automation in der aktuellen Situation durchführbaren Manöver enthalten sind (siehe Kapitel 6.1.2).

Gleichheit bei Manövern bedeutet, dass beide Manöver den gleichen Manöverbegriff haben, die gleiche Ausprägung und Phase sowie die gleichen Werte der Beschreibungsparameter. Um das zu m_{aktuell} gleiche Manöver $m_{\text{durchführbar,=aktuell}}$ in der Menge $M_{\text{durchführbar}}$ zu finden, werden die Ähnlichkeiten der in $M_{\text{durchführbar}}$ enthaltenen Manöver bezüglich m_{aktuell} bestimmt. Dazu wird die in der Operation *Bestimme Ähnlichkeit* in m_{aktuell} definierte Ähnlichkeitsfunktion $f_{\text{ähnlich}}$ verwendet.

Ist die Ähnlichkeit des betrachteten Manövers aus $M_{\text{durchführbar}}$ bezüglich m_{aktuell} $s \approx 1$ ($s \in [0, 1]$), dann ist das Manöver $m_{\text{durchführbar},=\text{aktuell}}$ gefunden.

Wurde das Manöver $m_{\text{durchführbar},=\text{aktuell}}$ gefunden, so wird es mit dem Manöver m_{aktuell} zusammengeführt. Neben dem Valential sind in m_{aktuell} damit auch die Durchführbarkeit, der relative Wert und der Anlass des Manövers ausgefüllt. m_{aktuell} kann somit von der Automation weiter durchgeführt werden. Wurde das Manöver $m_{\text{durchführbar},=\text{aktuell}}$ nicht gefunden, bedeutet dies, dass m_{aktuell} für die Automation nicht durchführbar ist. m_{aktuell} wird dann das Valential $v = 0$ zugewiesen. Das Manöver m_{aktuell} wird schließlich als Wurzelmanöver des Baumes gesetzt.

Die übrigen in $M_{\text{durchführbar}}$ enthaltenen Manöver werden in den Baum als Folgemanöver $m_{\text{Folge}_1} \dots m_{\text{Folge}_n}$ eingefügt. Das Manöver mit dem größten Valential im Manöverbaum ist das automationspräferierte Manöver $m_{\text{präferiert}}$.

Um Kontinuität in der Handlungsgenerierung zu gewährleisten, ist eine eindeutige Erkennbarkeit der Manöver über die einzelnen Rechenzyklen hinaus notwendig. Der im Manöverobjekt vorhandene eindeutige Bezeichner b eines Manövers dient dieser Erkennbarkeit. Um die geforderte Erkennbarkeit über die einzelnen Rechenzyklen hinaus zu erreichen, werden bei den Manövern im Manöverbaum $\mathbf{M}_{\text{Automation}}$, die schon im letzten Rechenzyklus existierten, deren bereits bestimmte Bezeichner b übernommen. Für diese Übernahme der Bezeichner wird der im letzten Rechenzyklus aufgebaute Manöverbaum $\mathbf{M}_{\text{Automation,alt}}$ vorgehalten. Zur Bestimmung der bereits im letzten Rechenzyklus existierenden Manöver werden die Ähnlichkeitsfunktionen $f_{\text{ähnlich}}$ der Manöver angewendet (Operation *Bestimme Ähnlichkeit*). Durch die Ähnlichkeitsfunktionen werden die Manöver in $\mathbf{M}_{\text{Automation,alt}}$ ermittelt, die den in $\mathbf{M}_{\text{Automation}}$ enthaltenen Manövern gleichen. Bei diesen Manövern erfolgt die Übernahme der Bezeichner b aus dem letzten Rechenzyklus. Damit kann ein bestimmtes Manöver während seiner gesamten Existenz eindeutig identifiziert werden.

6.1.6 Berücksichtigung der Entscheidungshysterese

Die abschließende Entscheidungshysterese (siehe Abbildung 6.3) bewirkt, dass ein neues Manöver erst dann das höchste Valential der im Manöverbaum enthaltenen Manöver bekommen kann, wenn die Valentialdifferenz zum aktuellen Valential des letzten Manövers mit dem höchsten Valential einen Schwellwert überschreitet. Die Automation hat so die Tendenz, an einem präferierten Manöver festzuhalten und sich erst für ein neues als präferiertes Manöver zu entscheiden, wenn die Hysterese überwunden ist.

Ein Grund für dieses Verhalten ist die Kompatibilität zum Fahrer. Menschen neigen im Allgemeinen dazu, bei Entscheidungen zwischen Handlungsalternativen diejenige Alternative zu bevorzugen, für die sie sich bereits vorher entschieden hatten. Damit tendieren sie dazu, die Ausführung einer bereits ausgewählten Handlungsalternative beizubehalten, anstatt die Ausführung einer neuen Handlungsalternative zu beginnen („status quo bias“ [171, 108]).

Ein weiterer Grund für die Einführung der Entscheidungshysterese ist die Gewährleistung der Stabilität der Manöverentscheidungen der Automation. Ohne die Entscheidungshysterese könnten Grenzyklen auftreten, in denen sich das präferierte Manöver ständig ändert. Dieses könnte zum Beispiel zu Schwingungen im Verhalten des Fahrzeuges und damit zu einem instabilen und unsicheren Fahrzeugverhalten führen.

Zur Realisierung der Entscheidungshysterese wird zunächst geprüft, ob sich das automationspräferierte Manöver geändert hat. Dazu wird das präferierte Manöver des aktuellen Manöverbaumes $m_{\text{präferiert_aktuell}}$ mit dem im letzten Zyklus präferierten Manöver $m_{\text{präferiert_alt}}$ verglichen. Dazu erfolgt die Nutzung des Bezeichners b der Manöver, durch den ein Manöver während seiner gesamten Existenz eindeutig identifiziert werden kann. Ist $m_{\text{präferiert_aktuell}} \neq m_{\text{präferiert_alt}}$, muss die Hysterese angewendet werden. Es wird nun das zu $m_{\text{präferiert_alt}}$ gleiche Manöver im aktuellen Manöverbaum $m_{\text{präferiert_alt_aktuell}}$ bestimmt. Hierzu werden ebenfalls die Bezeichner b verwendet. Wenn dieses Manöver vorhanden ist, wird das neue automationspräferierte Manöver nur im aktuellen Manöverbaum beibehalten, wenn die Valentiaidifferenz der beiden Manöver $m_{\text{präferiert_aktuell}}$ und $m_{\text{präferiert_alt_aktuell}}$ im aktuellem Manöverbaum einen Schwellwert überschreitet. Anderenfalls wird das Valential des Manövers $m_{\text{präferiert_aktuell}}$ vermindert sowie das Valential des Manövers $m_{\text{präferiert_alt_aktuell}}$ so erhöht, dass es nun das automationspräferierte Manöver im aktuellen Manöverbaum darstellt.

Im Rahmen der manöverbasierten Umsetzung der kooperativen Automation erfolgt die Realisierung der Entscheidungshysterese in der Operation *Setze Baum zusammen* des Manöverbaumes (siehe Kapitel 5.2).

6.1.7 Funktionale Sicherheit beim Aufbau des Manöverbaumes

Ungeachtet dessen, dass die Gewährleistung von funktionaler Sicherheit nicht im Fokus dieser Arbeit steht, wird die Thematik für den Aufbau des Manöverbaumes aufgrund ihrer Wichtigkeit im Folgenden angerissen.

Funktionale Sicherheit bei der Manöverplanung bedeutet einerseits, dass jederzeit mindestens ein sicheres Manöver zur Ausführung geplant wird. Das heißt, im Manöverbaum $\mathbf{M}_{\text{Automation}}$ muss mindestens ein sicheres durchführbares Manöver vorhanden sein. Andererseits bedeutet funktionale Sicherheit in diesem Kontext, dass sämtliche als durchführbar im Manöverbaum $\mathbf{M}_{\text{Automation}}$ festgelegten Manöver sicher sind. Das heißt, jedes zur Ausführung infrage kommende Manöver muss sicher sein. Um die funktionale Sicherheit der Manöverplanung zu gewährleisten, müssen beide Aspekte garantiert werden.

Eine Ursache für die Nichtzurverfügungstellung mindestens eines sicheren durchführbaren Manövers in $\mathbf{M}_{\text{Automation}}$ liegt in der Unvollständigkeit des Regelwerks bezüglich des auftretenden Situationsumfanges. Dies kann bei der Verwendung der Fuzzy Logik begründet sein durch fehlerhafte Modellierungen der linguistischen Variablen und Regeln oder durch fehlerhafte Berechnungen bei der Auswertung dieser. Des Weiteren könnten beim Entwurf der Manöver relevante Situationen innerhalb des adressierten Situationsumfanges nicht berücksichtigt worden sein. Außerdem könnten Situationen auftreten, die über den adressierten Situationsumfang hinausgehen, entweder weil dieser Umfang zu gering gewählt wurde oder eine bewusst gewählte Systemgrenze durch den Fahrer überschritten wurde.

Hinsichtlich der möglichen Ursachen dafür, dass eines der zur Ausführung infrage kommenden Manöver nicht sicher ist, ist die Korrektheit des Regelwerks von großer Bedeutung. Konkret bedeutet dies, dass in einer Situation fälschlicherweise ein Manöver als durchführbar erkannt werden könnte, das objektiv nicht durchführbar ist und dessen Ausführung daher zu einer potentiell unsi-

cheren Situation führen würde. Die Gründe dafür liegen analog zum oben betrachteten Fall. Diese sind einerseits fehlerhafte Modellierungen der linguistischen Variablen und Regeln oder fehlerhafte Berechnungen bei der Auswertung dieser. Andererseits können beim Entwurf eines Manövers Situationen fälschlicherweise in den durch das Manöver adressierten Situationsumfang einbezogen worden sein.

Wie bereits bei der Auswahl der Fuzzy Logik als Methode angemerkt wurde, ist der Einsatz formaler Methoden zum Nachweis der funktionalen Sicherheit aufgrund der Nichtlinearität der Fuzzy Logik schwierig. Im Rahmen dieser Arbeit wurden daher einerseits umfangreiche Tests durchgeführt, um die funktionale Sicherheit und auch die Zuverlässigkeit zu gewährleisten (siehe Kapitel 8). Andererseits wurden verschiedene Mechanismen in der kooperativen Automation umgesetzt, um die Sicherheit zur Laufzeit zu gewährleisten.

Der beim Aufbau des Manöverbaumes umgesetzte Sicherheitsmechanismus zielt darauf ab, zu gewährleisten, dass jederzeit mindestens ein sicheres durchführbares Manöver in $\mathbf{M}_{\text{Automation}}$ vorhanden ist. Dieses wird dadurch erreicht, dass beim Entwurf der Manöver ein oder mehrere Manöver $m_{\text{sicherer_Zustand}}$ eingebaut werden, die das Fahrzeug jederzeit möglichst schnell in einen sicheren Zustand bringen. Konkret heißt dies, dass jederzeit mindestens ein derartiges Manöver $m_{\text{sicherer_Zustand}}$ durchführbar sein muss ($d > d_{\min}$). Ist in einer aktuell vorliegenden Situation kein anderes außer einem Manöver $m_{\text{sicherer_Zustand}}$ durchführbar, so wird dieses Manöver automatisch zum automationspräferierten Manöver in $\mathbf{M}_{\text{Automation}}$, da in dem Manöverbaum kein weiteres durchführbares Manöver enthalten ist. Aufgrund dessen wird das Manöver $m_{\text{sicherer_Zustand}}$ daraufhin im weiteren Verlauf der Manöverplanung auch direkt zum von der Automation ausgeführten Manöver und die Ausführung von $m_{\text{sicherer_Zustand}}$ beginnt.

Als sicherer Zustand wird in dieser Arbeit der Stillstand des Fahrzeuges definiert. Das heißt, es muss gewährleistet sein, dass jederzeit mindestens ein Manöver $m_{\text{sicherer_Zustand}}$ durchführbar ist, welches das Fahrzeug schnell in den Stillstand bringen oder es im Stillstand verharren lassen kann. Dazu wurden die beiden Manöver „Notbremsen“ und „Stillstehen“ ausgewählt (zur Definition der Manöver siehe Kapitel 5.1.3). Das Manöver „Notbremsen“ ist immer dann durchführbar, wenn das Fahrzeug sich nicht im Stillstand befindet. Es bekommt in diesem Fall die Durchführbarkeit $d = 1$ zugewiesen. Es sorgt bei Ausführung dafür, dass das Fahrzeug möglichst schnell in den Stillstand gebracht wird. Befindet sich das Fahrzeug im Stillstand, so ist das Manöver „Stillstehen“ durchführbar (Durchführbarkeit $d = 1$). Das Manöver sorgt dafür, dass das Fahrzeug im Stillstand verharret. Da jederzeit eines der beiden Manöver „Notbremsen“ und „Stillstehen“ durchführbar ist, ist somit gewährleistet, dass das Fahrzeug jederzeit in den sicheren Zustand gebracht oder im sicheren Zustand gehalten werden kann. Damit ist garantiert, dass jederzeit mindestens ein sicheres Manöver zur Ausführung geplant wird.

Weitere Sicherheitsmechanismen wurden in der Bearbeitungsebene Steuerung / Regelung umgesetzt. Diese zielen auf die Absicherung der als durchführbar im Manöverbaum $\mathbf{M}_{\text{Automation}}$ festgelegten Manöver ab. Es wird abgesichert, dass sich bei der Ausführung eines Manövers ein sicheres Fahrverhalten des Fahrzeuges ergibt. Die Ausführung der Manöver wird zu diesem Zweck ständig überwacht. Es wurde dazu unabhängig von der Manöverplanung in der Bearbeitungsebene Steuerung / Regelung eine automatische Notbremsfunktionalität umgesetzt. Diese bringt beim Verlassen

von definierten befahrbaren Bereichen oder einer potentiell gefährlichen Annäherung an ein anderes Objekt das Fahrzeug zum Stillstand.

6.2 Berücksichtigung des Entscheidungsspielraumes

Nach dem Aufbau des Manöverbaumes stellt sich die Frage, welches der im Manöverbaum $M_{Automation}$ vorhandenen Manöver von der kooperativen Automation beabsichtigt werden soll auszuführen. Die kooperative Automation für das teil- und hochautomatisierte Fahren kann nicht grundsätzlich das automationspräferierte Manöver ausführen, wie es in einem vollautomatischen Fahrzeug möglich wäre. Aufgrund der Kooperation mit dem Fahrer müssen bei dieser Entscheidung die Rolle der Automation und der aus der Rollendefinition resultierende Entscheidungsspielraum beachtet werden (siehe Kapitel 3.2.7). Durch den Entscheidungsspielraum ist festgelegt, welche Entscheidungen die Automation direkt treffen darf und bei welchen Entscheidungen Rücksprache mit dem Fahrer gehalten werden muss. Auf der Bearbeitungsebene Manöverplanung legt der Entscheidungsspielraum daher fest, welche Manöver die Automation direkt auf alleinige Initiative ausführen darf und welche nicht. Die Ausführung eines solchen Manövers bedarf dann einer expliziten Freigabe durch den Fahrer.

Unter Berücksichtigung des Entscheidungsspielraumes wird somit die Entscheidung getroffen, welches der im Manöverbaum $M_{Automation}$ vorhandenen Manöver von der kooperativen Automation beabsichtigt werden soll auszuführen (zur Definition des von der Automation ausgeführten Manövers siehe Definition 4.3). Um das von der Automation beabsichtigt auszuführende Manöver im Manöverbaum zu kennzeichnen, wird diesem die Markierung „ausgeführt“ zugewiesen (siehe Abbildung 6.9). Im Ablauf der Bearbeitungsebene Manöverplanung (siehe Abbildung 6.1) erfolgt die Berücksichtigung des Entscheidungsspielraumes als zweiter Schritt nach dem Aufbau des Manöverbaumes $M_{Automation}$. Für diesen Schritt ist im Rahmen der manöverbasierten Umsetzung der kooperativen Automation die Operation *Berücksichtige Entscheidungsspielraum* des Manöverbaumes (siehe Kapitel 5.2 und 5.3) vorgesehen.

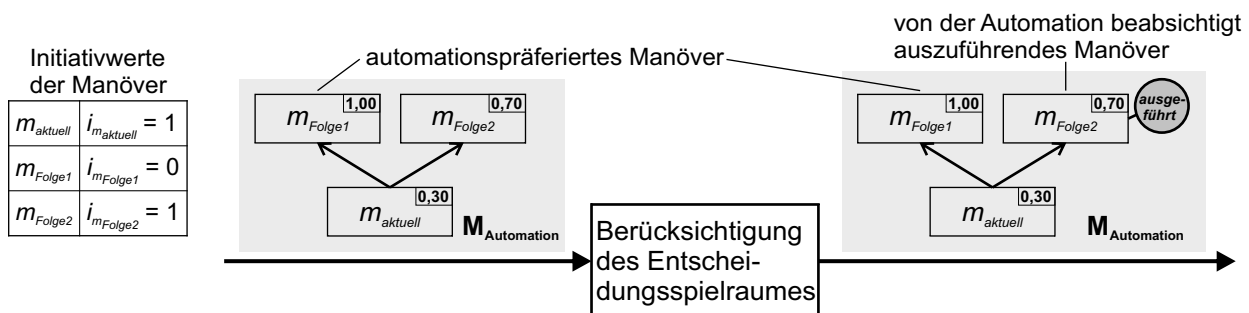


Abbildung 6.9: Berücksichtigung des Entscheidungsspielraumes mittels beispielhafter Manöverbäume: Aufgrund der dargestellten Initiativwerte wird das von der Automation beabsichtigt auszuführende Manöver ausgewählt.

Für die Modellierung des Entscheidungsspielraumes auf der Bearbeitungsebene Manöverplanung wird der boolesche Initiativwert i der Manöver verwendet (siehe Kapitel 5.1.1). Ein Initiativwert $i = 1$ bedeutet, dass die Automation das Manöver direkt auf alleinige Initiative ausführen kann. Ist

hingegen $i = 0$, kann das Manöver nicht direkt auf alleinige Initiative der Automation ausgeführt werden. Die Ausführung dieses Manövers kann nur durch eine explizite Freigabe des Fahrers veranlasst werden. Die Einstellung der Initiativwerte der im System verfügbaren Manöver wird bei der Gestaltung des Systemverhaltens anhand der Rollendefinition der Automation vorgenommen. Beispielsweise kann das Manöver „Fahrzeug folgen“ direkt von der Automation ausgeführt werden. Die Ausführung des Manövers „Fahrstreifen wechseln“ sollte hingegen einer Freigabe durch den Fahrer bedürfen.

Als von der Automation beabsichtigt auszuführendes Manöver wird im Manöverbaum jenes Manöver gesetzt, welches das größte Valential der direkt ausführbaren Manöver im Manöverbaum $\mathbf{M}_{\text{Automation}}$ hat. Präferiert die Automation ein Manöver, das nicht direkt ausführbar ist, kann eine Freigabe der Ausführung nur in einer expliziten Kommunikation mit dem Fahrer eingeholt werden. Während der Abstimmung mit dem Fahrer führt die Automation weiterhin das Manöver mit dem größten Valential der direkt ausführbaren Manöver im Manöverbaum aus.

Im in Abbildung 6.9 gezeigten Beispiel sind die Initiativwerte der Manöver $i_{m_{\text{aktuell}}} = 1$, $i_{m_{\text{Folge1}}} = 0$ und $i_{m_{\text{Folge2}}} = 1$. Das Manöver m_{Folge2} ist somit das Manöver, welches das größte Valential der direkt ausführbaren Manöver aufweist und wird daher als beabsichtigt auszuführendes Manöver gesetzt. Das automationspräferierte Manöver m_{Folge1} kann aufgrund seines Initiativwertes nicht direkt ausgeführt werden.

6.3 Ermöglichung der gemeinsamen Manöverplanung mittels impliziter Kommunikation

Nachdem der Manöverbaum der Automation $\mathbf{M}_{\text{Automation}}$ vollständig erstellt und der Entscheidungsspielraum berücksichtigt wurde, erfolgt auf dieser Grundlage die gemeinsame Manöverplanung von Automation und Fahrer (siehe Abbildung 6.1). Zuerst wird die Möglichkeit geschaffen, mittels impliziter Kommunikation von Automation und Fahrer die gemeinsame Manöverplanung durchzuführen. Im Rahmen der manöverbasierten Umsetzung der kooperativen Automation wird die dazu im Folgenden vorgestellte Vorgehensweise in der Operation *Ermögliche gemeinsame Manöverplanung mittels impliziter Kommunikation* des Manöverbaumes realisiert (siehe Kapitel 5.2). Implizite Kommunikation bedeutet auf der Bearbeitungsebene Manöverplanung die durch die Beobachtung und Beeinflussung des aktuell vom Fahrzeug gefahrenen Manövers auftretende Kommunikation (zur Definition der impliziten Kommunikation siehe Kapitel 3.2.6 und Abbildung 3.6). Dabei ist es nicht die vordergründige Absicht des jeweils einen Partners, dem jeweils anderen eine Botschaft zu senden. Die Möglichkeit der Beeinflussung des aktuell vom Fahrzeug gefahrenen Manövers wird jedem Partner durch die gemeinsame Handlungsausführung gegeben.

Der Empfang von impliziten Manöverbotschaften des Fahrers durch die Automation wird ermöglicht durch die Erkennung des aktuell vom Fahrzeug gefahrenen Manövers m_{aktuell} , das als Wurzelmanöver im Manöverbaum $\mathbf{M}_{\text{Automation}}$ vorhanden ist. Die kooperative Automation kann aufgrund dieser Information mit der Anpassung ihres Manöverplanes reagieren und somit einen gemeinsamen Manöverplan erstellen. Die Automation hat die Möglichkeit, wenn das aktuell vom Fahrzeug gefahrene Manöver m_{aktuell} durchführbar ist (Valential $v > 0$), dieses Manöver weiter auszuführen.

Dazu wird das Manöver m_{aktuell} als das von der Automation beabsichtigt auszuführende Manöver im Manöverbaum $\mathbf{M}_{\text{Automation}+}$ ausgewählt (siehe Abbildung 6.10). Da die Initiative zur Ausführung des Manövers vom Fahrer ausgeht, muss der Entscheidungsspielraum der Automation dabei nicht berücksichtigt werden. Der Manöverbaum $\mathbf{M}_{\text{Automation}+}$ unterscheidet sich darüber hinaus nicht vom Manöverbaum $\mathbf{M}_{\text{Automation}}$.

Damit wird ermöglicht, dass der Fahrer ein Manöver initiiert und die kooperative Automation dieses Manöver je nach aktueller Verteilung der Kontrollanteile weiter ausführt oder den Fahrer bei der Ausführung unterstützt. Die Kontrollanteile können währenddessen konstant sein, es kann aber auch eine Transition erfolgen. Der Fahrer könnte unter Nutzung eines hohen Kontrollanteiles die Ausführung eines Manövers beginnen, dann seinen Kontrollanteil stark vermindern und die Automation dieses Manöver weiter ausführen lassen, während er sich selbst aus der Handlungsausführung weitgehend zurückzieht.

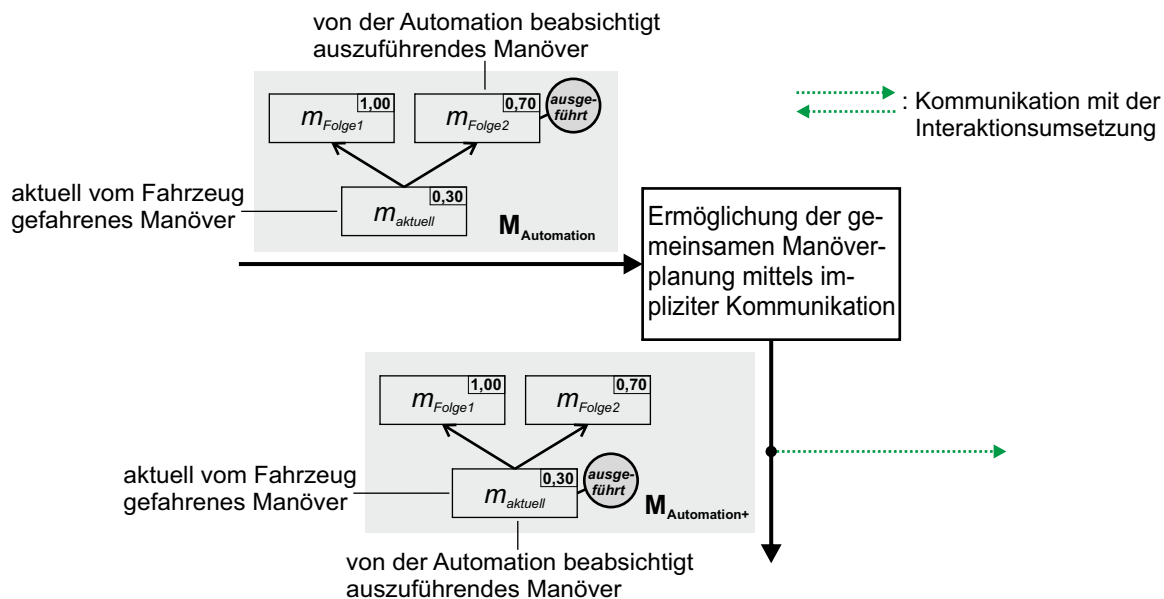


Abbildung 6.10: Ermöglichung der gemeinsamen Manöverplanung mittels impliziter Kommunikation: Das Manöver m_{aktuell} wird als das von der Automation beabsichtigt auszuführende Manöver im Manöverbaum $\mathbf{M}_{\text{Automation}+}$ ausgewählt.

Bis auf die Bedingung, dass das Manöver m_{aktuell} über ein Valential $v > 0$ verfügen muss, ist das Verhalten unabhängig von den durch die Valentiale ausgedrückten Präferenzen der Automation gestaltet. Mittels der Valentiale im Manöverbaum $\mathbf{M}_{\text{Automation}+}$ werden die Automationspräferenzen jedoch weiterhin zum Ausdruck gebracht.

Die beschriebene Methode der gemeinsamen Handlungsplanung mittels impliziter Kommunikation bietet die Möglichkeit, den von Sheridan beschriebenen Aspekt von „Cooperative Control“ umzusetzen (siehe auch Kapitel 2.1). Für ihn zeichnet sich „Cooperative Control“ dadurch aus, dass einer der Akteure eine Handlung initiiert und der andere sie anpasst oder verfeinert („There are also forms of cooperative control where control is initiated by one agent (human or computer) and the other trims or refines it“ [188, S. 65]).

Abbildung 6.11 zeigt eine Beispielsequenz für die gemeinsame Manöverplanung mittels impliziter Kommunikation. Während dieser Beispielsequenz erfolgt keine Veränderung des Manöverbaumes

$M_{\text{Automation}+}$ durch die nachgelagerte gemeinsame Manöverplanung mittels expliziter Kommunikation. Daher wird das von der Automation beabsichtigt auszuführende Manöver im Manöverbaum $M_{\text{Automation}+}$ zugleich zum von der Automation ausgeführten Manöver.

Im Ausgangszustand (Zeitpunkt t_1) befindet sich das Fahrzeug im Manöver „Fahrstreifen folgen“. Die Automation führt dieses Manöver ebenso wie der Fahrer aus. Das vom Fahrzeug ausgeführte Manöver ist aufgrund der gemeinsamen Handlungsausführung das Resultat der Addition des Wirkens von Fahrer und Automation. Der Fahrer initiiert nun einen Fahrstreifenwechsel nach links (Zeitpunkt t_2). Während er beginnt, den Fahrstreifenwechsel auszuführen, führt die Automation weiterhin das automationspräferierte Manöver „Fahrstreifen folgen“ aus. Da das Wirken des Fahrers stark genug ist, bewegt sich das Fahrzeug jedoch in Richtung der linken Fahrstreifenmarkierung und beginnt somit einen Fahrstreifenwechsel. Wenn die Automation den Fahrstreifenwechsel als aktuell vom Fahrzeug gefahrenes Manöver erkannt hat (Wurzelmanöver im Manöverbaum $M_{\text{Automation}+}$), beginnt auch sie, dieses Manöver auszuführen (Zeitpunkt t_3). Die Markierung „ausgeführt“ wird dazu von der Automation auf das Manöver „Fahrstreifen wechseln nach links“ gesetzt. Der Fahrer könnte nun sein Wirken zurücknehmen und das Manöver durch das Wirken der Automation weiter ausführen lassen.

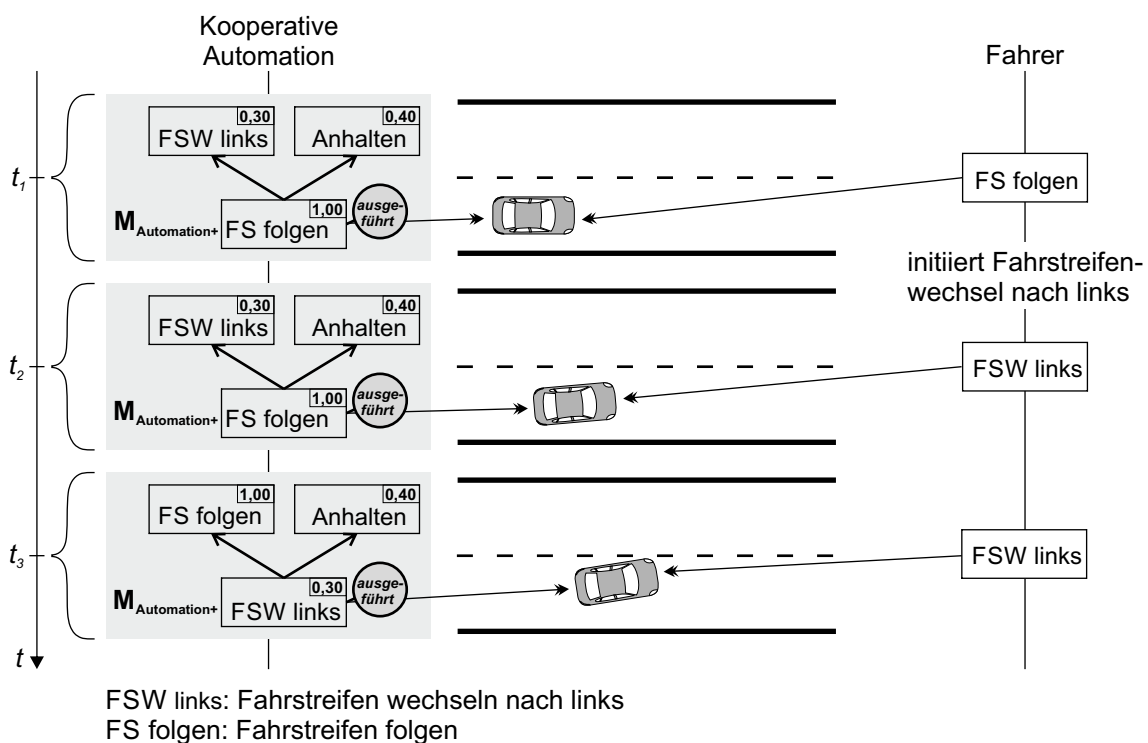


Abbildung 6.11: Beispielsequenz für die gemeinsame Manöverplanung mittels impliziter Kommunikation

6.4 Ermöglichung der gemeinsamen Manöverplanung mittels expliziter Kommunikation

Die Nutzung von expliziter Kommunikation zwischen Automation und Fahrer stellt neben der impliziten Kommunikation die zweite Möglichkeit dar, um die gemeinsame Manöverplanung durchzuführen. Im in Abbildung 6.1 dargestellten Ablauf der Bearbeitungsebene Manöverplanung bildet die Ermöglichung der gemeinsamen Manöverplanung mittels expliziter Kommunikation den abschließenden Verarbeitungsschritt. Die Realisierung der im Folgenden dazu vorgestellten Vorgehensweise erfolgt im Rahmen der manöverbasierten Umsetzung der kooperativen Automation in der Operation *Ermögliche gemeinsame Manöverplanung mittels expliziter Kommunikation* des Manöverbaumes (siehe Kapitel 5.2).

Die Umsetzung der gemeinsamen Manöverplanung mittels expliziter Kommunikation basiert auf der Idee der Verhandlung zwischen Fahrer und Automation über die geplanten Manöver. Für die Gestaltung dieser Verhandlung mit dem Fahrer ist der Arbitrer zuständig, der einen wichtigen Bestandteil der Bearbeitungsstufe Interaktionsumsetzung bildet und daher die Mensch-Maschine-Schnittstelle der kooperativen Automation verwenden kann (für detaillierte Informationen zum Konzept der Arbitrierung siehe zum Beispiel Kelsch et al. [110]). Als Grundlage der Verhandlung stellt die Bearbeitungsebene Manöverplanung der Interaktionsumsetzung und somit auch dem Arbitrer den Manöverbaum $\mathbf{M}_{\text{Automation}+}$ zur Verfügung (siehe Abbildung 6.1 und Abbildung 6.12). Der Manöverbaum $\mathbf{M}_{\text{Automation}+}$ bietet dem Arbitrer dazu die Informationen, welche Manöver für die Automation durchführbar sind, wie die Manöverpräferenzen der Automation aussehen (durch die Valentiale) und welches Manöver die Automation beabsichtigt auszuführen (durch die Markierung „ausgeführt“).

Die Unterschiede der Valentiale der einzelnen Manöver ermöglichen es dem Arbitrer, in der Verhandlung dem Fahrer gezielt deutlich zu machen, welche Manöver im Vergleich zu den übrigen Manövern stärker oder weniger stark von der Automation präferiert sind. So könnte zum Beispiel vom Fahrer ein relativ hoher Überzeugungsaufwand erforderlich sein, um die Automation von der Ausführung eines weniger präferierten Manövers zu überzeugen, während der Fahrer zur Freigabe der Ausführung des automationspräferierten Manövers nur einen vergleichsweise kleinen Impuls geben muss.

Nach der Verhandlungsphase trifft der Arbitrer aufgrund der Ergebnisse der Verhandlung eine stabile Entscheidung über das gemeinsam präferierte Manöver der beiden Partner Automation und Fahrer. Dieser gemeinsame Wille wird von der Interaktionsumsetzung im Manöverbaum $\mathbf{M}_{\text{Interaktion}}$ dargestellt und der Bearbeitungsebene Manöverplanung übermittelt (siehe Abbildung 6.12). Das gemeinsam präferierte Manöver wird durch Zuweisung des höchstmöglichen Valentiales $v = 1$ gekennzeichnet. Den übrigen Manövern im Manöverbaum $\mathbf{M}_{\text{Interaktion}}$ wird das Valentiale $v = 0$ zugewiesen. Auf der Bearbeitungsebene Manöverplanung erfolgt die weitere Verarbeitung des Manöverbaumes $\mathbf{M}_{\text{Interaktion}}$ im Schritt „Ermöglichung der gemeinsamen Manöverplanung mittels expliziter Kommunikation“ (siehe Abbildung 6.12).

Der Manöverbaum $\mathbf{M}_{\text{Interaktion}}$ ist ausgenommen der Valentiale ein Duplikat des Manöverbaumes $\mathbf{M}_{\text{Automation}+}$, auf dem die Verhandlung mit dem Fahrer basierte. Dies ermöglicht die Prüfung, ob sich die Entscheidung des Arbiters auf die nach Abschluss der Verhandlung aktuelle Situation beziehen lässt. Der Manöverbaum $\mathbf{M}_{\text{Interaktion}}$ ist in der aktuellen Situation gültig, wenn das

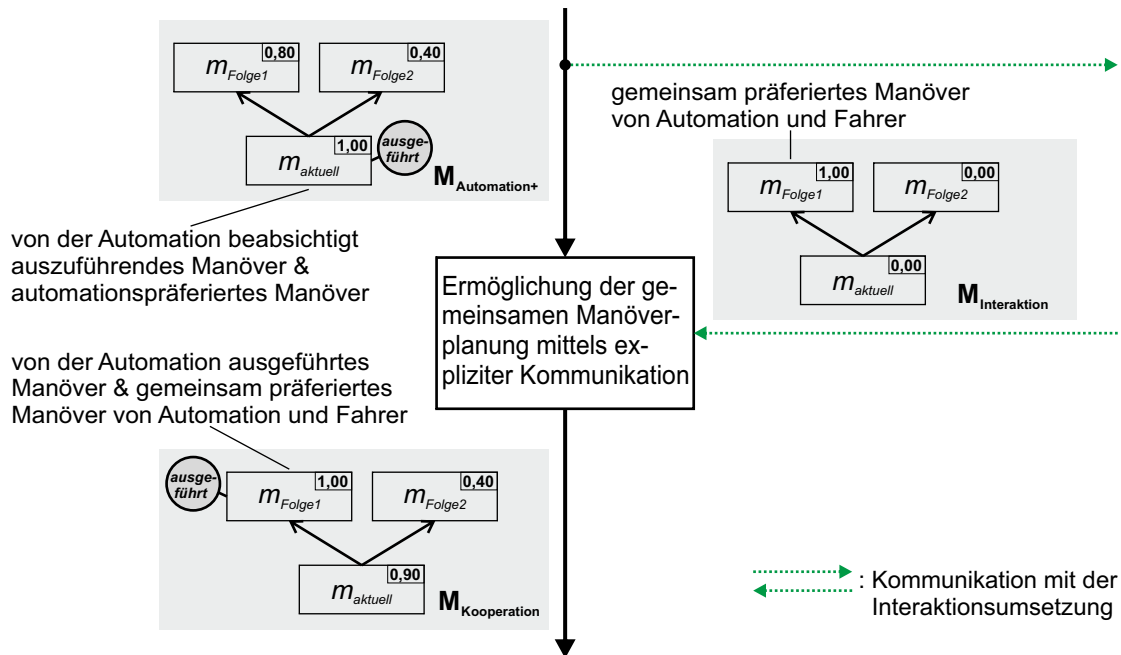


Abbildung 6.12: Ermöglichung der gemeinsamen Manöverplanung mittels expliziter Kommunikation: Das Manöver m_{Folge1} wird aufgrund des während der Verhandlung mittels der Interaktionsumsetzung festgestellten gemeinsamen Willens von Automation und Fahrer zum von der Automation ausgeführten Manöver in $M_{Kooperation}$.

gemeinsam präferierte Manöver in dieser Situation gültig ist. Damit ist die Bearbeitungsebene Manöverplanung nicht abhängig von einem bestimmten zeitlichen Antwortverhalten der Interaktionsumsetzung. Wird festgestellt, dass $M_{Interaktion}$ in der aktuellen Situation nicht gültig ist, wird der Baum für die gemeinsame Manöverplanung nicht berücksichtigt.

Die Interaktionsumsetzung übermittelt den aufgrund der Entscheidung des Arbiters erstellten Manöverbaum $M_{Interaktion}$ an die Bearbeitungsebene Manöverplanung ereignisgesteuert jeweils dann, wenn der Arbiter eine Entscheidung getroffen hat. Trifft der Arbiter keine Manöverentscheidung, wird kein Manöverbaum $M_{Interaktion}$ von der Interaktionsumsetzung zur Verfügung gestellt. Dies ist zum Beispiel der Fall, wenn es zu keiner Verhandlung mit dem Fahrer kommt, da dieser mit dem aktuell von der Automation ausgeführten Manöver einverstanden ist. Es ist die Aufgabe der Bearbeitungsebene Manöverplanung, einen Manöverbaum $M_{Interaktion}$ so lange vorzuhalten und zu verwenden, bis dieser in der aktuellen Situation nicht mehr gültig ist. Dadurch wird gewährleistet, dass eine gemeinsam getroffene Manöverentscheidung so lange durch die Automation umgesetzt wird, bis das betreffende Manöver abgeschlossen ist oder sich die Situation grundlegend geändert hat, so dass eine weitere Umsetzung nicht mehr möglich ist.

Bei Manövern, die nur in einem bestimmten Zeitfenster oder örtlichen Bereich durchführbar sind, wird diese Information von der Bearbeitungsebene Manöverplanung bestimmt und dem Arbiter im betreffenden Manöver zur Verfügung gestellt. Dadurch verfügt der Arbiter über das Wissen, bis wann oder wo die Verhandlung abgeschlossen und eine Entscheidung getroffen sein muss. Ein Beispiel hierfür ist das Manöver „Abbiegen“, das nur in einem bestimmten Bereich an einer Abbiegung durchführbar ist. Wird in einem solchen Fall durch den Arbiter keine Entscheidung getroffen oder erfolgt die Entscheidung zu spät, so erfolgt die weitere Handlungsgenerierung der Automation

ausschließlich mittels des Baumes $M_{Automation+}$. Die Manöverplanung ist folglich nicht auf Entscheidungen des Arbiters angewiesen, um für eine sinnvolle (und sichere) Fahrzeugführung seitens der Automation zu sorgen.

Das Ergebnis der gemeinsamen Manöverplanung mittels der expliziten Kommunikation wird im Manöverbaum $M_{Kooperation}$ dargestellt (siehe Abbildung 6.12). Dieser Manöverbaum steuert die weitere Handlungsgenerierung auf den der Manöverplanung folgenden Bearbeitungsebenen der kooperativen Automation (siehe Kapitel 5.3).

Das in Abbildung 6.13 dargestellte Flussdiagramm zeigt die für die Ermöglichung der gemeinsamen Manöverplanung mittels expliziter Kommunikation entworfene Vorgehensweise, die auf die Umsetzung der beschriebenen Aspekte abzielt. Diese Vorgehensweise wird im Folgenden vorgestellt.

Falls ein neuer Manöverbaum $M_{Interaktion}$ vorliegt, wird dieser genutzt. Ist dies nicht der Fall, wird geprüft, ob ein im letzten Rechenzyklus gespeicherter Manöverbaum $M_{Interaktion}$ vorhanden ist. Wenn ein solcher vorhanden ist, erfolgt die Nutzung dieses Baumes. Liegt kein Manöverbaum $M_{Interaktion}$ vor, bildet der Baum $M_{Automation+}$ das Ergebnis $M_{Kooperation} = M_{Automation+}$. Dem durch die Markierung „ausgeführt“ als beabsichtigt auszuführendes Manöver im Manöverbaum $M_{Automation+}$ gekennzeichneten Manöver wird dabei im Manöverbaum $M_{Kooperation}$ ebenfalls die Markierung „ausgeführt“ zugewiesen. Damit führt die Automation tatsächlich das Manöver aus, welches von ihr beabsichtigt wird auszuführen (siehe dazu auch Kapitel 5.3).

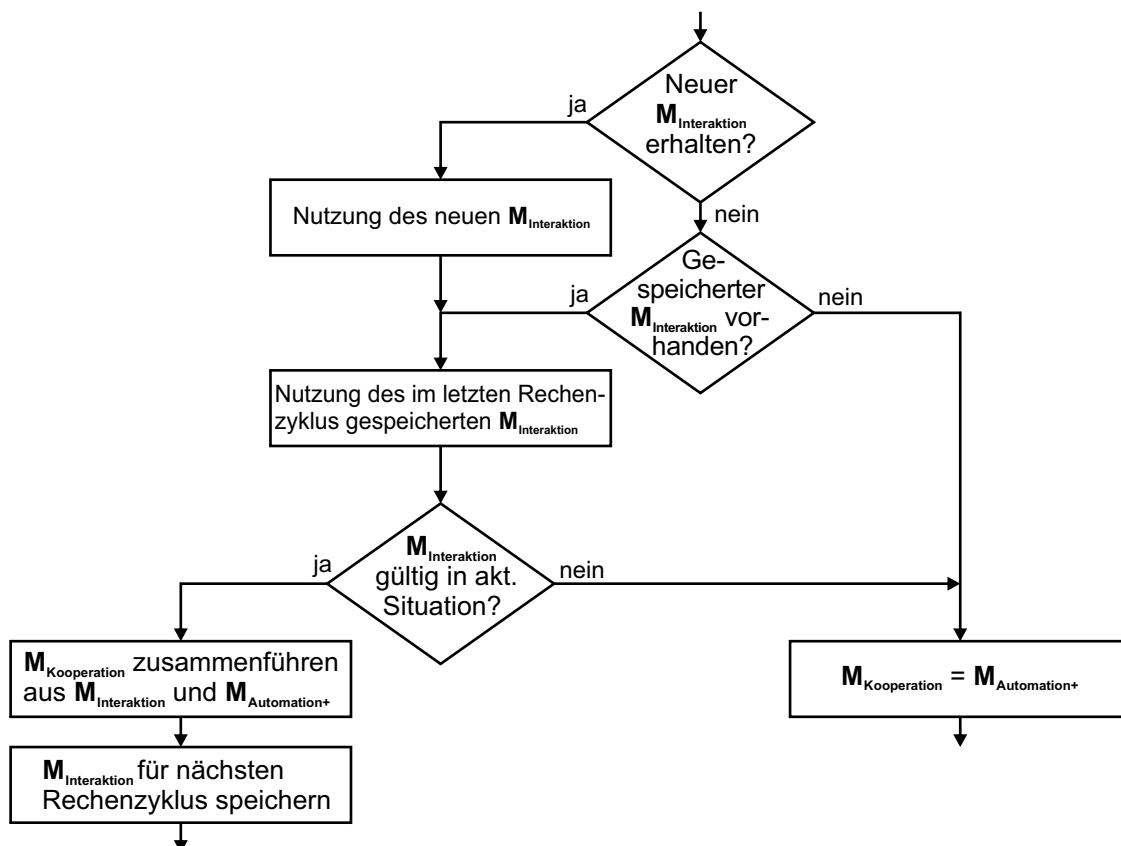


Abbildung 6.13: Flussdiagramm des Schrittes „Ermöglichung der gemeinsamen Manöverplanung mittels expliziter Kommunikation“

Steht ein Manöverbaum $\mathbf{M}_{\text{Interaktion}}$ zur Nutzung bereit, wird dieser auf Gültigkeit in der aktuellen Situation geprüft (siehe Abbildung 6.13). Um die Gültigkeit von $\mathbf{M}_{\text{Interaktion}}$ in der aktuellen Situation zu prüfen, wird das in $\mathbf{M}_{\text{Interaktion}}$ enthaltene gemeinsam präferierte Manöver auf Gleichheit zu den in $\mathbf{M}_{\text{Automation+}}$ enthaltenen Manövern geprüft. Der Manöverbaum $\mathbf{M}_{\text{Automation+}}$ wird in jedem Rechenzyklus der Bearbeitungsebene Manöverplanung vor der Ermöglichung der gemeinsamen Manöverplanung mittels expliziter Kommunikation neu bestimmt und bezieht sich so auf die aus Sicht der Bearbeitungsebene Manöverplanung aktuelle Situation. Wenn zu dem gemeinsam präferierten Manöver in $\mathbf{M}_{\text{Interaktion}}$ ein gleiches in $\mathbf{M}_{\text{Automation+}}$ vorhanden ist, ist das betreffende Manöver in $\mathbf{M}_{\text{Interaktion}}$ in der aktuellen Situation gültig. Für die Prüfung der Gleichheit werden die Bezeichner b der Manöver genutzt.

Da diese Prüfung bei jedem im Baum $\mathbf{M}_{\text{Interaktion}}$ enthaltenen Manöver durchgeführt wird, kann festgestellt werden, ob in $\mathbf{M}_{\text{Automation+}}$ neue Manöver enthalten oder ob Manöver weggefallen sind. Diese Information kann genutzt werden, um dem Arbiter auf eine im Vergleich zu seiner Entscheidung geänderte Situation aufmerksam zu machen und ihn so gezielt zur Aufnahme einer Verhandlung aufzufordern.

Ist $\mathbf{M}_{\text{Interaktion}}$ in der aktuellen Situation noch gültig, werden die beiden Manöverbäume $\mathbf{M}_{\text{Interaktion}}$ und $\mathbf{M}_{\text{Automation+}}$ zum Baum $\mathbf{M}_{\text{Kooperation}}$ zusammengeführt. Die Grundlage von $\mathbf{M}_{\text{Kooperation}}$ bildet ein Duplikat von $\mathbf{M}_{\text{Automation+}}$, da dieser Baum im Vergleich zu $\mathbf{M}_{\text{Interaktion}}$ der aktuellere Baum ist. Dem vom Arbiter bestimmten gemeinsam präferierten Manöver wird im Baum $\mathbf{M}_{\text{Kooperation}}$ das Valential $v = 1$ zugewiesen. Die Valentiale der übrigen Manöver werden aus dem Baum $\mathbf{M}_{\text{Automation+}}$ übernommen. Das automationspräferierte Manöver wird dabei so abgewertet, dass sein Valential zwischen dem gemeinsam präferierten Manöver und dem zweitpräferierten Manöver der Automation liegt. Als ausgeführtes Manöver wird das gemeinsam präferierte Manöver gesetzt. Die in Abbildung 6.12 beispielhaft gezeigten Manöverbäume illustrieren diese Vorgehensweise. Nach dem Zusammenführen von $\mathbf{M}_{\text{Kooperation}}$ wird $\mathbf{M}_{\text{Interaktion}}$ abschließend für den nächsten Rechenzyklus gespeichert.

Abbildung 6.14 zeigt beispielhaft eine Sequenz mit mehreren Rechenzyklen der Manöverplanung und der Interaktionsumsetzung zur Darstellung der gemeinsamen Manöverplanung mittels expliziter Kommunikation.

Zu Beginn ist in der Manöverplanung kein Manöverbaum $\mathbf{M}_{\text{Interaktion}}$ vorhanden. Daher besteht der Baum $\mathbf{M}_{\text{Kooperation}}$ aus einem Duplikat des Baumes $\mathbf{M}_{\text{Automation+}}$. Da durch $\mathbf{M}_{\text{Kooperation}}$ die Handlungsgenerierung auf den weiteren Bearbeitungsebenen gesteuert wird, führt die Automation somit das beabsichtigt auszuführende Manöver aus dem Manöverbaum $\mathbf{M}_{\text{Automation+}}$ auch tatsächlich aus.

Die Interaktionsumsetzung sendet parallel zur Manöverplanung in jedem Zyklus vom Arbiter gestaltete explizite Botschaften an den Fahrer. Die Botschaften basieren auf dem von der Manöverplanung zur Verfügung gestellten Manöverbaum $\mathbf{M}_{\text{Automation+}}$. Zum Zeitpunkt t_1 erhält der Arbiter einen neuen Manöverbaum $\mathbf{M}_{\text{Automation+}}$. Aufgrund dieses Baumes unterbreitet er mittels einer expliziten Botschaft dem Fahrer ein Verhandlungsangebot. Der Fahrer geht darauf ein und die Verhandlungsphase beginnt. Nach einiger Zeit ist die Verhandlung abgeschlossen, der Arbiter trifft eine Entscheidung und teilt diese der Manöverplanung mittels $\mathbf{M}_{\text{Interaktion}}$ zum Zeitpunkt t_2 mit.

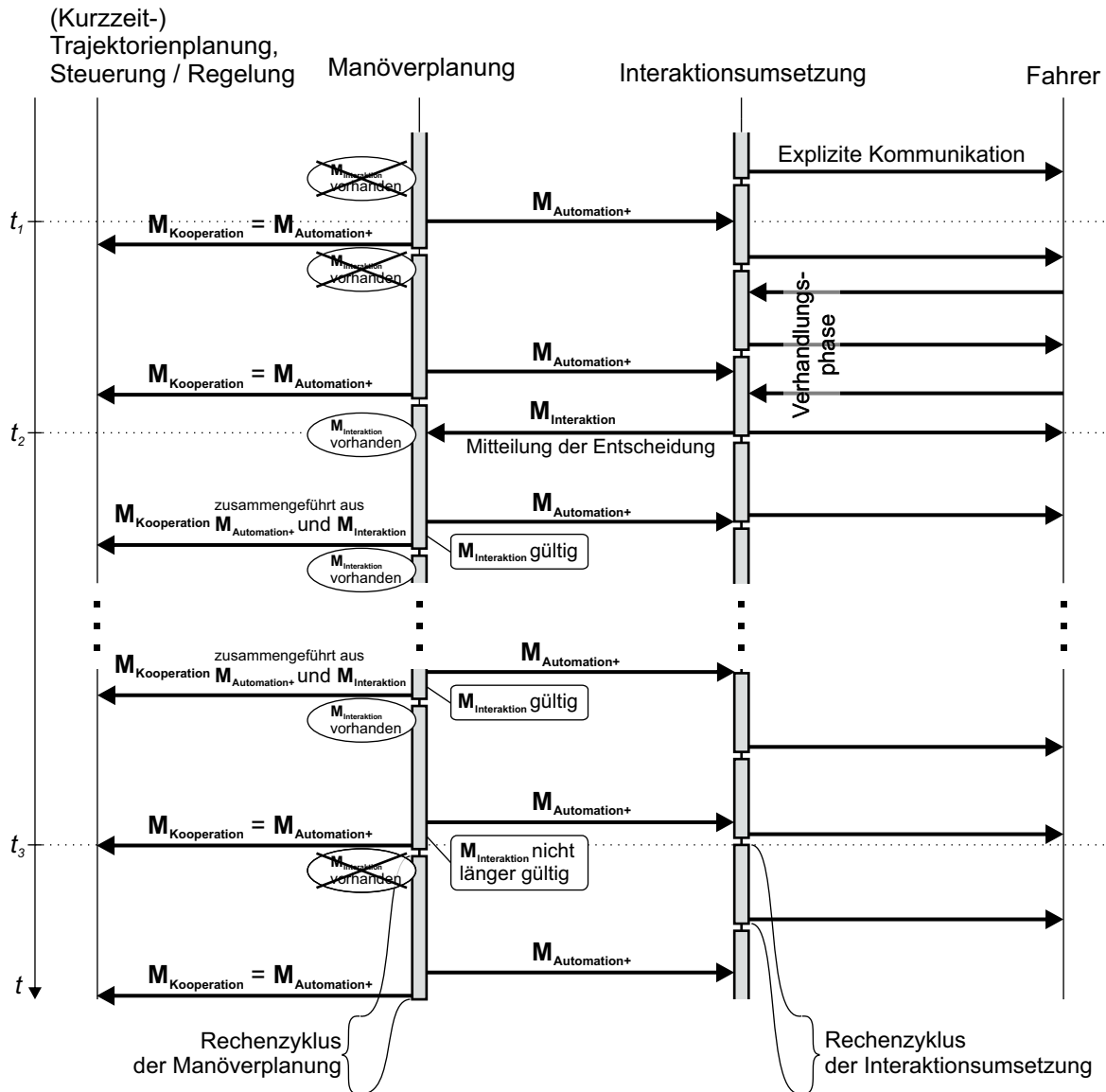


Abbildung 6.14: Beispielsequenz für die gemeinsame Manöverplanung mittels expliziter Kommunikation

Währenddessen generiert die Manöverplanung weiterhin den Baum $M_{Kooperation} = M_{Automation+}$, der zur weiteren Handlungsgenerierung innerhalb der Automation verwendet wird. Ab dem Zeitpunkt t_2 ist in der Manöverplanung ein Baum $M_{Interaktion}$ vorhanden. Es wird festgestellt, dass der erhaltene Baum $M_{Interaktion}$ in der aktuellen Situation gültig ist. Durch die Zusammenführung von $M_{Automation+}$ und $M_{Interaktion}$ wird daraufhin $M_{Kooperation}$ gebildet. Dadurch führt die Automation das vom Arbitr bestimmten gemeinsam präferierte Manöver aus.

Durch die Betrachtung der Rechenzyklen wird ersichtlich, dass der von der Manöverplanung zurückerhaltene Baum $M_{Interaktion}$ auf einem mindestens einen Rechenzyklus alten Baum $M_{Automation+}$ basiert. Dies zeigt deutlich die Notwendigkeit der Gültigkeitsprüfung auch bei einem neu erhaltenen Baum $M_{Interaktion}$.

Die Umsetzung des vom Arbitr bestimmten gemeinsam präferierten Manövers erfolgt bis zum Zeitpunkt t_3 . In der Manöverplanung wurde zuvor festgestellt, dass der Manöverbaum $M_{Interaktion}$ in der aktuellen Situation nicht länger gültig ist. Daher wird dieser Baum nicht weiter vorgehalten

und zur weiteren Handlungsgenerierung verwendet die Automation wie zu Beginn $M_{\text{Kooperation}} = M_{\text{Automation+}}$.

6.5 Zusammenfassung des Kapitels

In diesem Kapitel wurde ein Ansatz zur Umsetzung der Bearbeitungsebene Manöverplanung der kooperativen Automation vorgestellt. Als Grundlage dieses Kapitels diente die in Kapitel 5 dargestellte manöverbasierte Umsetzung der kooperativen Automation.

Zunächst wurde die für den Aufbau des Manöverbaumes entwickelte Vorgehensweise beschrieben. Diese integriert die Erkennung des aktuell vom Fahrzeug gefahrenen Manövers, die Bestimmung der durchführbaren Manöver sowie die Ermittlung der Präferenzen der Automation hinsichtlich des auszuführenden Manövers. Zur Erfüllung dieser einzelnen Aufgaben wurde die Methode der Fuzzy Logik ausgewählt. Ein besonderer Fokus lag auf der Umsetzung des Kooperation ausmachenden Elementes Kompatibilität. Im Anschluss wurde auf die Umsetzung der Kooperation ausmachenden Elemente gemeinsame Handlungsplanung, Rolle und Entscheidungsspielraum sowie Kommunikation auf der Bearbeitungsebene Manöverplanung eingegangen. Es wurden dazu die Berücksichtigung des Entscheidungsspielraumes hinsichtlich des auszuführenden Manövers sowie die Ermöglichung der gemeinsamen Manöverplanung mittels impliziter und expliziter Kommunikation beleuchtet.

Die wesentliche Neuheit der in diesem Kapitel vorgestellten Überlegungen liegt in der Darstellung eines detaillierten Konzeptes zur Umsetzung der Kooperation zwischen Automation und Fahrer auf der Bearbeitungsebene Manöverplanung für das teil- und hochautomatisierte Fahren. Dieses Konzept wird aus einzelnen neuartigen Ansätzen zur Umsetzung der genannten Kooperation ausmachenden Elemente geformt. Damit trägt dieses Kapitel zur Beantwortung der zweiten zentralen Fragestellung dieser Arbeit „Welche Konzepte und Methoden eignen sich für die technische Umsetzung der kooperativen Automation für das teil- und hochautomatisierte Fahren?“ bei.

Die zur Beantwortung der Fragestellung ausstehenden technischen Evaluierungen erfolgten im Rahmen des in dieser Arbeit angewendeten iterativen Entwicklungsprozesses. In Kapitel 8 werden diese Evaluierungen dargestellt. In diesem Rahmen werden auch detaillierte Ergebnisse aus Fahrversuchen vorgestellt, die auf die Umsetzung der Bearbeitungsebene Manöverplanung fokussieren. Im folgenden Kapitel 7 wird unter anderem die Anwendung der hier dargestellten Methode zum Aufbau des Manöverbaumes beispielhaft für das Manöver „Fahrstreifen wechseln“ gezeigt. Die folgende Tabelle 6.4 gibt abschließend eine Kurzzusammenfassung des vorliegenden Kapitels 6.

Inhalt des Kapitels
<ul style="list-style-type: none"> • Ansatz zur Umsetzung der Bearbeitungsebene Manöverplanung der kooperativen Automation • Auf Fuzzy Logik basierende Vorgehensweise zum Aufbau des Manöverbaumes • Integrierte Vorgehensweise zur Erkennung des aktuell vom Fahrzeug gefahrenen Manövers, der Bestimmung der durchführbaren Manöver sowie der Ermittlung der Präferenzen der Automation hinsichtlich des auszuführenden Manövers • Besonderer Fokus auf der Umsetzung des Kooperation ausmachenden Elementes Kompatibilität • Berücksichtigung des Entscheidungsspielraumes • Ermöglichung der gemeinsamen Manöverplanung mittels impliziter und expliziter Kommunikation
Beitrag zum Stand der Technik
<ul style="list-style-type: none"> • Darstellung eines detaillierten Konzeptes zur Umsetzung der Kooperation zwischen Automation und Fahrer auf der Bearbeitungsebene Manöverplanung für das teil- und hochautomatisierte Fahren
Stand bezüglich der Fragestellungen der Arbeit
<p>Fragestellung 2: „Welche Konzepte und Methoden eignen sich für die technische Umsetzung der kooperativen Automation für das teil- und hochautomatisierte Fahren?“</p> <p>Erreichter Stand hinsichtlich der Beantwortung der Fragestellung 2:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Durch das vorgestellte Konzept zur Umsetzung der Kooperation zwischen Automation und Fahrer auf der Bearbeitungsebene Manöverplanung erfolgte eine Detaillierung des in Kapitel 5 vorgestellten manöverbasierten Umsetzungskonzeptes; damit wird ein Beitrag zur detaillierteren Beantwortung der Fragestellung geliefert <p>Offen zur vollständigen Beantwortung der Fragestellung 2:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Technische Evaluierung hinsichtlich der Erfüllung der avisierten Funktionalität → Kapitel 8 <p>Weiterer Beitrag zur detaillierteren Beantwortung der Fragestellung 2:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Detaillierte exemplarische Beschreibung der Modellierung des Manövers „Fahrstreifen wechseln“ → Kapitel 7

Tabelle 6.4: Kurzzusammenfassung von Kapitel 6

7 Modellierung des Manövers „Fahrstreifen wechseln“

In Kapitel 5.1 wurde die allgemeine Modellierung der Manöver im Rahmen der manöverbasierten Umsetzung der kooperativen Automation vorgestellt. Im vorliegenden Kapitel wird exemplarisch die Anwendung dieser Modellierung für das Manöver „Fahrstreifen wechseln“ dargestellt. Aus den für die Umsetzung des Autobahnszenarios modellierten Manövern (siehe Kapitel 5.1.3) wurde das Manöver „Fahrstreifen wechseln“ für diese Darstellung ausgewählt, da es sich dabei um ein vergleichsweise komplexes Manöver handelt, bei dem sämtliche Elemente der Modellierung Verwendung finden. Da bei der Modellierung eines Manövers ein besonderer Fokus auf der Umsetzung des Kooperation ausmachenden Elementes Kompatibilität liegt, findet dieses Element auch bei der Modellierung des Manövers „Fahrstreifen wechseln“ besondere Beachtung.

Im Weiteren erfolgt zunächst die Definition des Manövers „Fahrstreifen wechseln“ (Kapitel 7.1). Auf dieser Grundlage werden in Kapitel 7.2 die einzelnen Elemente zur Modellierung des Manövers auf der Bearbeitungsebene Manöverplanung beschrieben, die über eine spezialisierte Definition für das Manöver „Fahrstreifen wechseln“ verfügen. Im Anschluss wird in Kapitel 7.3 die Umsetzung der von der kooperativen Automation benötigten Fähigkeiten auf der Bearbeitungsebene Manöverplanung für das Manöver „Fahrstreifen wechseln“ vorgestellt. Es erfolgt dazu die Anwendung der in Kapitel 6.1 beschriebenen Methode, die auf der Nutzung der Fuzzy Logik basiert. Abschließend werden in Kapitel 7.4 Anforderungen an einen Trajektorienplanungsalgorithmus zur Nutzung auf der Bearbeitungsebene (Kurzzeit-) Trajektorienplanung für das Manöver „Fahrstreifen wechseln“ dargelegt.

7.1 Definition des Manövers

Um eine zum Fahrer kompatible Definition des Manövers „Fahrstreifen wechseln“ zu erreichen, werden gemäß der in Kapitel 5.1.3 beschriebenen Vorgehensweise aus der Literatur bekannte Ergebnisse aus Analysen des Fahrverhaltens von Fahrern zugrunde gelegt. Die Definition des Manövers „Fahrstreifen wechseln“ orientiert sich daher an den in derartigen Analysen erarbeiteten Definitionen. Hier sind zum Beispiel Arbeiten von van Winsum et al. [200], Fastenmeier et al. [60, 61] und Ehmanns [55] zu nennen. Im Weiteren werden die in diesen Arbeiten verwendeten Definitionen des Manövers „Fahrstreifen wechseln“ zunächst kurz vorgestellt. Anschließend erfolgt die Darstellung der im Rahmen der vorliegenden Arbeit entwickelten Definition des Manövers.

Für Fastenmeier et al. [60, 61] umfasst der Prozess des Fahrstreifenwechselns das Verlassen des bisher befahrenen Fahrstreifens und „die Positionierung des Fahrzeuges auf einem benachbarten Fahrstreifen“. Kennzeichnende Merkmale für einen vollständigen Fahrstreifenwechsel sind für sie die „Überschreitung der gegebenen Fahrstreifenmarkierung“, „die Blockierung des zu verlassenden wie des angesteuerten neuen Fahrstreifens“ und „die Positionierung des Fahrzeuges mit allen Rädern auf dem neuen [...] Fahrstreifen“. Dem eigentlichen Fahrstreifenwechsel vorgelagert sehen

sie die Entscheidung, ob der Fahrstreifenwechsel durchgeführt werden soll und die Vorbereitung des Manövers zum Beispiel durch eine Geschwindigkeitsanpassung. Den folgenden Fahrstreifenwechsel teilen die Autoren weiter in den Beginn, die Durchführung und den Abschluss ein. Unter Beginn und Durchführung fassen sie das Setzen des Blinkers und das Steuern des Fahrzeuges auf den Zielfahrstreifen durch Lenkbewegungen mit eventuell notwendigen Geschwindigkeitsanpassungen zusammen. Den Abschluss des Manövers bilden für sie die Positionierung des Fahrzeuges in der Mitte des neuen Fahrstreifens mit eventuell notwendigen Geschwindigkeitsanpassungen und das Beenden des Blinksignals. Zur näheren Beschreibung eines Fahrstreifenwechsels werden in den Arbeiten von Fastenmeier et al. verschiedene Anlässe dargestellt („Überholen“, „Spurwahl“, „gewünschte Fahrtrichtung“, „Einfädeln“, „überraschendes Ausweichen“).

Van Winsum et al. [200] beschreiben den Fahrstreifenwechsel basierend auf dem Lenkwinkelverlauf in drei aufeinanderfolgenden Phasen. Die erste Phase beginnt mit der Lenkbewegung in Richtung des neuen Fahrstreifens. Der Beginn der zweiten Phase ist markiert durch das Erreichen des maximalen Lenkwinkels und somit den Beginn der Gegenlenkbewegung. Sie endet, wenn der Verlauf des Gierwinkels des Fahrzeuges relativ zum Fahrbahnverlauf sein Maximum erreicht. Der Lenkwinkelverlauf hat zu diesem Zeitpunkt seinen Nulldurchgang. Das Ende der dritten Phase wird markiert durch das Erreichen des maximalen Lenkwinkels der Gegenlenkbewegung, um das Fahrzeug auf dem Zielfahrstreifen zu positionieren und tangential zum Fahrbahnverlauf auszurichten.

Ehmanns [55] beschreibt eine aus vier Schritten bestehende Vorgehensweise für den Fahrstreifenwechsel. Nach der Bildung des Wunsches, den Fahrstreifen zu wechseln, erfolgt das taktische Fahrerverhalten, das darauf abzielt, einen zukünftigen Fahrstreifenwechsel zu ermöglichen. Der nächste Schritt besteht für Ehmanns aus der Prüfung der Durchführbarkeit des Manövers. Ist diese gegeben, beginnt in seinem Modell abschließend die eigentliche Durchführung des Fahrstreifenwechsels.

Auf der Grundlage der vorgestellten Definitionen erfolgte die Entwicklung der im Rahmen der vorliegenden Arbeit unter Nutzung der Definition des Manöverbegriffs (siehe Definition 4.1) erstellten Definition des Manövers „Fahrstreifen wechseln“, die im Folgenden dargestellt wird. Durch diese wird die eigentliche Durchführung des Fahrstreifenwechsels adressiert. Abbildung 7.1 zeigt zunächst exemplarisch eine Bewegung, die von dem definierten Manöver „Fahrstreifen wechseln“ umfasst wird.

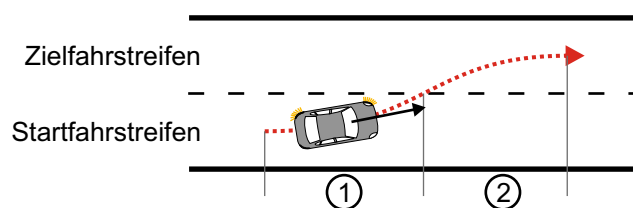


Abbildung 7.1: Manöver „Fahrstreifen wechseln“

Zu Beginn des Manövers folgt das betrachtete Fahrzeug dem Startfahrstreifen, um sich dann direkt in Richtung der Mitte des Zielfahrstreifens zu bewegen. Dieser befindet sich unmittelbar benachbart neben dem Startfahrstreifen. Das Fahrzeug ist dabei in Richtung des Zielfahrstreifens ausgerichtet. Während des Manövers passiert das betrachtete Fahrzeug die sich zwischen Start- und Zielfahrstreifen befindliche Fahrstreifenmarkierung. Den Abschluss des Manövers bilden die mittige Positionierung des Fahrzeuges im Zielfahrstreifen und die tangentiale Ausrichtung zur Fahrbahn, so

dass das Fahrzeug nun dem Zielfahrstreifen folgt. Das Manöver beschreibt somit die Durchführung des Fahrstreifenwechsels. Taktisches Fahrverhalten vor dem eigentlichen Fahrstreifenwechsel, das zum Beispiel ein Aufschließen auf eine den Fahrstreifenwechsel ermöglichende Lücke beinhaltet, wird durch das Manöver „Fahrstreifenwechsel vorbereiten“ beschrieben (siehe Kapitel 5.1.3).

7.2 Elemente der Modellierung des Manövers auf der Bearbeitungsebene Manöverplanung

Auf der Grundlage der im vorigen Abschnitt vorgestellten Definition des Manövers „Fahrstreifen wechseln“ werden im Weiteren die Elemente der Modellierung des Manövers auf der Bearbeitungsebene Manöverplanung beschrieben, die über eine spezialisierte Definition für das Manöver „Fahrstreifen wechseln“ verfügen. Diese Elemente sind die Ausprägung, die Phase und der Anlass. Sie dienen der detaillierteren begrifflichen Beschreibung des Manövers (siehe Kapitel 5.1.1). Tabelle 7.1 zeigt vorab eine Übersicht der Definitionen dieser Elemente.

Element	Mögliche Belegungen für das Manöver „Fahrstreifen wechseln“
Manöverbegriff B	Fahrstreifen wechseln
Ausprägung α	Nach links, nach rechts
Anlass a	Ausweichen, Fahrstreifenwahl, Überholen, Rechtsfahrgebot, kein Anlass
Phase p	1: Start, 2: Ende

Tabelle 7.1: Elemente der Modellierung des Manövers „Fahrstreifen wechseln“ auf der Bearbeitungsebene Manöverplanung

7.2.1 Ausprägungen und Phasen

Für das Manöver werden die Ausprägungen „nach links“ und „nach rechts“ unterschieden. Beim Fahrstreifenwechsel nach links befindet sich der Zielfahrstreifen links neben dem Startfahrstreifen, beim Fahrstreifenwechsel nach rechts befindet er sich rechts neben dem Startfahrstreifen.

Zur Strukturierung des Ablaufes des Manövers wird es in zwei Phasen eingeteilt (siehe Abbildung 7.1). Die erste Phase dauert solange an, bis der Schwerpunkt des Fahrzeuges die Fahrstreifenbegrenzung zwischen Start- und Zielfahrstreifen überschreitet. Die zweite Phase beschreibt die sich anschließende Bewegung zur Mitte des Zielfahrstreifens.

7.2.2 Anlässe

Der Anlass für ein Manöver liefert eine Begründung für die Ausführung des Manövers in einer betrachteten Situation (siehe Kapitel 5.1.1). Für den Fahrstreifenwechsel werden im Rahmen der vorliegenden Arbeit die Anlässe „Ausweichen“, „Fahrstreifenwahl“, „Überholen“, „Rechtsfahrgebot“ und „kein Anlass“ modelliert (siehe Abbildung 7.2).

Der Anlass „Ausweichen“ beschreibt einen durch eine hohe Kollisionsgefahr mit einem Vorderfahrzeug begründeten Fahrstreifenwechsel. Bei der Fahrstreifenwahl wird das Manöver durch die

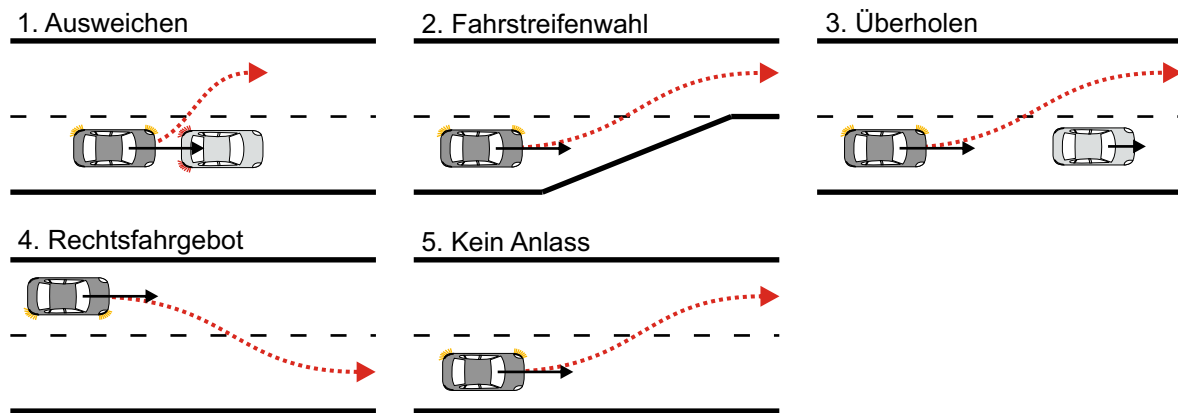


Abbildung 7.2: Anlässe des Manövers „Fahrstreifen wechseln“

Umsetzung einer Navigationsentscheidung oder das Ende des aktuellen Fahrstreifens veranlasst. Bei dem durch „Überholen“ beschriebenen Anlass besteht der Wunsch, schneller zu fahren, als es das Vorderfahrzeug zulässt. Der Fahrstreifenwechsel dient dann dazu, das Vorderfahrzeug zu überholen. Der Anlass „Rechtsfahrgebot“ begründet den Fahrstreifenwechsel mit der Umsetzung des in der Straßenverkehrs-Ordnung verankerten Gebotes „möglichst weit rechts zu fahren“ [36, § 2 Abs. 2]. Ausnahmen vom Rechtsfahrgebot [36, § 7 Abs. 1] werden zunächst nicht berücksichtigt. Ist ein Fahrstreifenwechsel unbegründet, wird dies durch den Anlass „kein Anlass“ dargestellt.

Der Anlass „Überholen“ ist nur bei Fahrstreifenwechseln nach links möglich, da aufgrund der Straßenverkehrs-Ordnung [36, § 5 Abs. 1] ein Vorderfahrzeug im Allgemeinen nur links überholt werden darf. Die in der Straßenverkehrs-Ordnung [36, § 7 Abs. 2 und 2a] beschriebenen Ausnahmen werden zunächst nicht berücksichtigt. Der Anlass Rechtsfahrgebot wird nur bei Fahrstreifenwechseln nach rechts in Betracht gezogen. Die übrigen genannten Anlässe können bei beiden Ausprägungen des Manövers (nach links und nach rechts) vorkommen.

Sind in einer Situation mehrere Anlässe möglich, wird der wichtigste Anlass basierend auf einer Priorisierung der Anlässe ausgewählt. Beginnend mit dem am höchsten priorisierten Anlass ist die Priorisierung durch die folgende Rangfolge festgelegt: „Ausweichen“, „Fahrstreifenwahl“, „Überholen“, „Rechtsfahrgebot“, „kein Anlass“. In solch einer Situation wird nun der Anlass ausgewählt, der die höchste Priorität der aktuell möglichen Anlässe aufweist. Durch die Priorisierung der Anlässe wird auf die Erreichung der Kompatibilität zum Fahrer abgezielt.

Der Anlass des Fahrstreifenwechsels hat einen entscheidenden Einfluss auf die Bestimmung des relativen Wertes des Manövers. Zum Beispiel gilt bei der Bestimmung des relativen Wertes des Manövers „Fahrstreifen wechseln“ bezüglich des Manövers „Fahrzeug folgen“: Ist der Anlass des Manövers „Fahrstreifen wechseln“ „Überholen“, bevorzugt die Automation das Manöver „Fahrstreifen wechseln“ gegenüber dem Manöver „Fahrzeug folgen“. Durch die Intensität des Anlasses „Überholen“ wird der Unterschied im relativen Wert der beiden Manöver beeinflusst. Liegt kein Anlass für das Manöver „Fahrstreifen wechseln“ vor, wird das Manöver „Fahrzeug folgen“ bevorzugt.

7.3 Umsetzung der Fähigkeiten zur Manöverplanung mittels Fuzzy Logik

Nachdem die einzelnen Elemente der Modellierung des Manövers „Fahrstreifen wechseln“ auf der Bearbeitungsebene Manöverplanung definiert wurden (siehe Tabelle 7.1), erfolgt im Weiteren auf dieser Basis die Umsetzung der Fähigkeiten zur Manöverplanung. Diese Fähigkeiten umfassen die Bestimmung der Wahrscheinlichkeit mit der das Manöver als aktuell gefahrenes infrage kommt sowie die Bestimmung der Durchführbarkeit des Manövers.

Um diese Aufgaben zu erfüllen, wird die in Kapitel 6.1 beschriebene Methode verwendet, die auf der Fuzzy Logik basiert. Aufgrund der zwei Ausprägungen sowie zwei Phasen folgen jeweils vier linguistische Regeln, um die Durchführbarkeit des Manövers sowie die Wahrscheinlichkeit mit der es als aktuell gefahrenes Manöver infrage kommt, zu bestimmen. Um das Prinzip darzustellen werden im Folgenden die linguistischen Regeln sowie die Fuzzifizierung der zugrunde liegenden scharfen Größen für den Fahrstreifenwechsel nach links vorgestellt.

7.3.1 Bestimmung der Wahrscheinlichkeit aktuell gefahrenes Manöver

Zur Bestimmung der Wahrscheinlichkeit w_{aktuell} mit der das Manöver „Fahrstreifen wechseln“ mit der Ausprägung „nach links“ als aktuell gefahrenes infrage kommt, dienen die Regeln R-FSW-L1_a für Phase 1 sowie R-FSW-L2_a für Phase 2. Die Nutzung dieser Regeln im Rahmen der Vorgehensweise zur Erkennung des wahrscheinlich aktuell vom Fahrzeug gefahrenen Manövers sowie die allgemeinen Anforderungen an die Formulierung der Regeln werden in Kapitel 6.1.4 beschrieben.

R-FSW-L1_a:

WENN $STA.\Delta y_F^L$ links_auf_Fahrstreifen **UND** $STA.\Delta \psi_F^L$ nach_links **UND** $STL.\exists$
DANN FSW_aL_p1^L aktuell_gefahren

R-FSW-L2_a:

WENN $STA.\Delta y_F^L$ rechts_auf_Fahrstreifen **UND** $STA.\Delta \psi_F^L$ nach_links **UND** $STR.\exists$ **UND**
 $STR.t_{\text{letzter_Aufenthalt}}^L$ kürzlich **DANN** FSW_aL_p2^L aktuell_gefahren

Die Definitionen der einzelnen in den Regeln verwendeten linguistischen Situationsmerkmale der Fahrstreifen finden sich in den Tabellen 5.4 und 5.5, in denen die zugrunde liegenden scharfen Größen beschrieben sind. Zusätzlich werden in Tabelle 7.2 die Definitionen sämtlicher verwendeter Variablen im Überblick gezeigt. Die Definition des Operators „UND“ ist in Definition A.1 gegeben. Der Erstellung der Regeln für die Erkennung des Fahrstreifenwechsels liegt die Analyse der Verläufe von relevanten Größen bei einem Fahrstreifenwechsel zugrunde. Als Basis dienen die Ergebnisse verschiedener Studien, die sich mit der Analyse der Durchführung von Fahrstreifenwechseln beschäftigen (zum Beispiel: Lee et al. [122], Sporer et al. [190], van Winsum et al. [200]). Abbildung 7.3 zeigt exemplarisch den Verlauf verschiedener Größen während eines von einem Fahrer in einem Fahrsimulator gefahrenen Fahrstreifenwechselmanövers.

Wie in Abbildung 7.3 gezeigt wird, ist das Fahrzeug während des Fahrstreifenwechsels nach links ebenfalls nach links ausgerichtet. Der Gierwinkel relativ zur Ausrichtung des Fahrstreifens

Symbol	Bedeutung	Einheit
STA	Aktueller Fahrstreifen	-
STL	Fahrstreifen links	-
STR	Fahrstreifen rechts	-
$STA.\Delta y_F^L$	Linguistische Variable der lateralen Abweichung der Eigenfahrzeugmitte von der Fahrstreifenmitte des aktuellen Fahrstreifens	-
$STA.\Delta \psi_F^L$	Linguistische Variable der Gierwinkelabweichung des Eigenfahrzeuges von der Tangente an den aktuellen Fahrstreifen	-
$STL.\exists$	Existenz des linken Fahrstreifens	1
$STR.\exists$	Existenz des rechten Fahrstreifens	1
$STR.t_{\text{letzter_Aufenthalt}}^L$	Linguistische Variable der Zeit seit letztem Aufenthalt des Eigenfahrzeuges auf dem rechten Fahrstreifen	-

Tabelle 7.2: Übersicht der in den Regeln zur Bestimmung der Wahrscheinlichkeit mit der das Manöver „Fahrstreifen wechseln“ als aktuell gefahrenes infrage kommt verwendeten Variablen

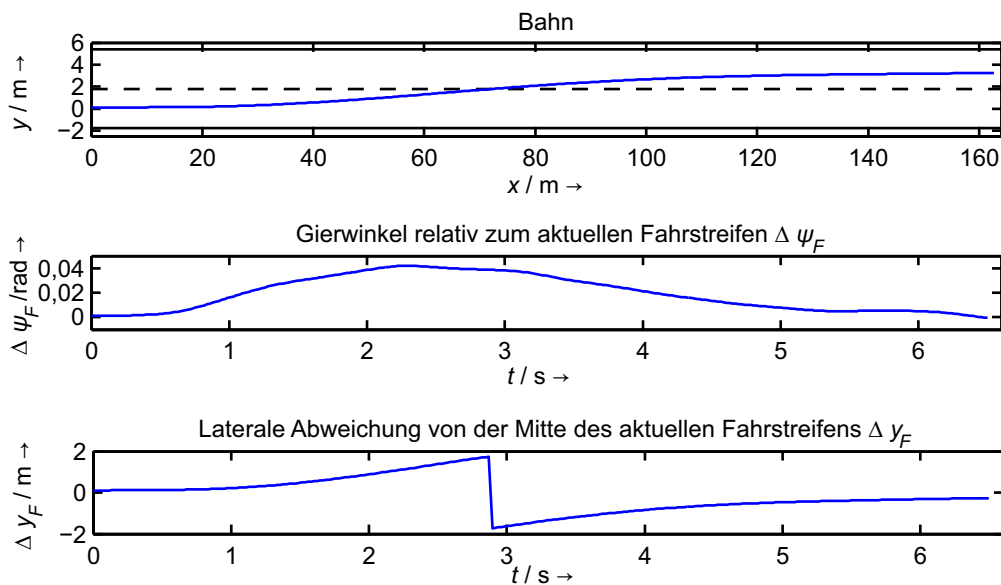


Abbildung 7.3: Exemplarischer Verlauf der Position, der lateralen Abweichung vom aktuellen Fahrstreifen Δy_F (zunächst Startfahrstreifen, nach dem Übertritt der Fahrstreifenmarkierung Ziel-fahrstreifen) und des Gierwinkels relativ zu den Fahrstreifen $\Delta \psi_F$ für einen Fahrstreifenwechsel nach links

$(STA.\Delta \psi_F)$ ist somit positiv. Ebenfalls charakteristisch ist, dass sich das Fahrzeug links neben der Mitte des Startfahrstreifens ($STA.\Delta y_F$) und rechts neben der Mitte des Zielfahrstreifens befindet. Damit ergibt sich die Regel für die erste Phase des Manövers. Zusätzlich ist hier das Wissen eingebracht, dass ein Fahrstreifenwechsel nur dann aktuell gefahren werden kann, wenn der Zielfahrstreifen auf der betreffenden Seite vorhanden ist ($STL.\exists$).

Nach dem Übergang auf den Zielfahrstreifen wechselt der aktuelle Fahrstreifen des Eigenfahrzeuges vom Startfahrstreifen zum Zielfahrstreifen. Daraus folgt für die zweite Phase des Fahrstreifen-

wechsels nach links, dass sich das Eigenfahrzeug rechts auf dem nun aktuellen Fahrstreifen befindet ($STA.\Delta y_F$). Die Ausrichtung in Richtung der Mitte des Zielfahrstreifens bleibt bestehen ($STA.\Delta \psi_F$). Des Weiteren kann nur ein Fahrstreifenwechselmanöver vorliegen, wenn sich rechts neben dem aktuellen ein Fahrstreifen (der Startfahrstreifen) befindet ($STR.\exists$). Bewegt sich das Eigenfahrzeug nur sehr langsam zur Mitte des Zielfahrstreifens, geht die Wahrscheinlichkeit, dass es sich noch um den Fahrstreifenwechsel handelt, mit der Zeit zurück. Ein Beobachter würde das Manöver nach einiger Zeit nicht mehr als Fahrstreifenwechsel bezeichnen. Um dieses zu berücksichtigen, wird die zweite Phase des Manövers nur erkannt, wenn sich das Eigenfahrzeug kürzlich noch auf dem rechten Nachbarfahrstreifen befand. Außerdem wird dadurch verhindert, dass ein Fahrstreifenwechsel aufgrund einer Pendelbewegung des Eigenfahrzeuges im aktuellen Fahrstreifen erkannt wird, bei dem es sich auch auf der rechten Fahrstreifenhälfte befinden und nach links ausgerichtet sein kann. Um die Zeit seit dem letzten Aufenthalt auf dem rechten Fahrstreifen $t_{\text{letzter_Aufenthalt}}$ zu fuzzifizieren, wird ausgenutzt, dass die für einen Fahrstreifenwechsel benötigte Zeit geschwindigkeitsunabhängig ist [61, 190]. Fastenmeier et al. [61] geben einen Zeitraum von 1,7 bis 4,9 Sekunden an, Sporrer et al. [190] einen Zeitraum von 3,1 bis 6,5 Sekunden. Da die Dauer der zweiten Phase eines Fahrstreifenwechsels tendenziell länger ist als die erste Phase [190], erfolgt die Wahl der Zugehörigkeitsfunktion des linguistischen Wertes „kürzlich“ von $t_{\text{letzter_Aufenthalt}}^L$, wie in Abbildung 7.4 dargestellt. Die ebenfalls in Abbildung 7.4 gezeigten Zugehörigkeitsfunktionen zur Bestimmung der linguistischen Werte zu Δy_F^L und $\Delta \psi_F^L$ wurden empirisch unter Berücksichtigung der in der Literatur veröffentlichten Verläufe der betreffenden Größen (siehe [190, 191, 200]) ermittelt.

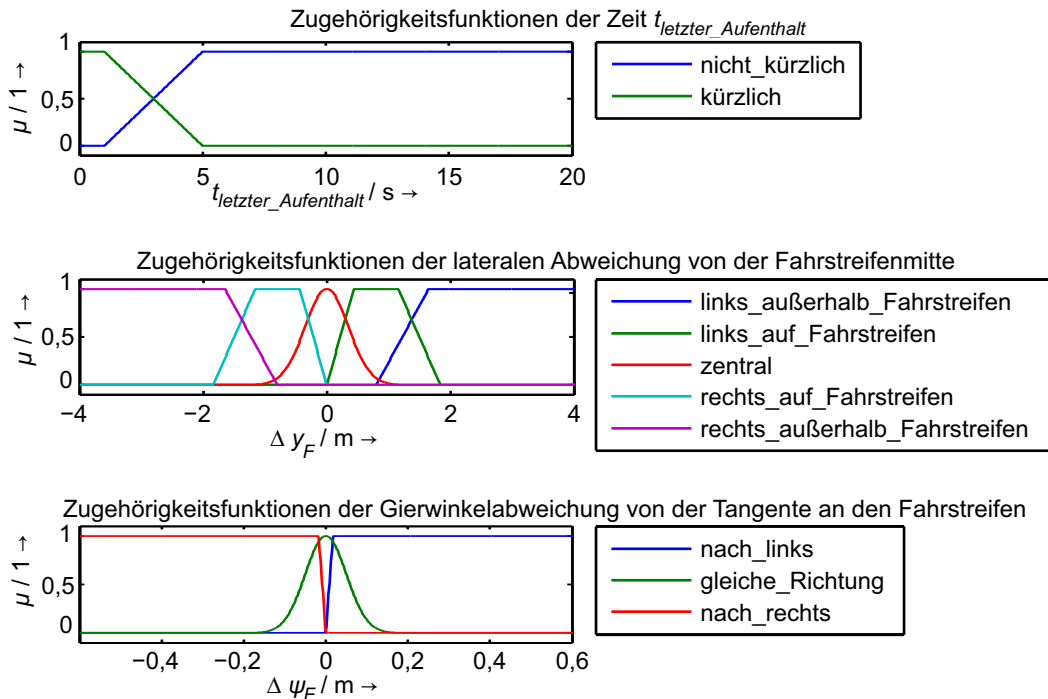


Abbildung 7.4: Zugehörigkeitsfunktionen der linguistischen Werte für $t_{\text{letzter_Aufenthalt}}$, Δy_F , $\Delta \psi_F$

7.3.2 Bestimmung der Durchführbarkeit

Zur Bestimmung der Durchführbarkeit d des Manövers „Fahrstreifen wechseln“ mit der Ausprägung „nach links“ werden die Regeln R-FSW-L1_d für die erste Phase und R-FSW-L2_d für die zweite Phase genutzt. Die Nutzung dieser Regeln im Rahmen der Vorgehensweise zur Bestimmung der durchführbaren Manöver wird in Kapitel 6.1.2.1 beschrieben. Bei der Formulierung der linguistischen Regeln zur Bestimmung der Durchführbarkeiten liegt die in Kapitel 6.1.2.2 anhand der Anforderungen dargestellte Systematik zur Formulierung dieser Regeln zugrunde.

R-FSW-L1_d:

WENN $STL.\exists$ **UND** $\neg FSL.\exists$ **UND**

$\left(\neg FHL.\exists \text{ ODER } \left(FHL.t_{HW}^L \text{ hinten_fern ODER}_{BS} \left(FHL.t_{HW}^L \text{ hinten_nah} \right. \right. \right.$
 $\left. \left. \text{UND} \left(FHL.t_{TC}^L \text{ moderat_beeinflusst ODER } FHL.t_{TC}^L \text{ unbeeinflusst} \right) \right) \right) \text{ UND}$
 $\left(\neg FVL.\exists \text{ ODER } \left(FVL.t_{HW}^L \text{ vorne_fern ODER}_{BS} \left(FVL.t_{HW}^L \text{ vorne_nah UND } \left(FVL.t_{TC}^L \right. \right. \right.$
 $\left. \left. \text{moderat_beeinflusst ODER } FVL.t_{TC}^L \text{ unbeeinflusst} \right) \right) \right) \right)$

DANN FSW_aL_p1^L durchführbar

R-FSW-L2_d:

WENN $STA.\Delta y_F^L$ rechts_auf_Fahrstreifen **UND** $STA.\Delta \psi_F^L$ nach_links **UND**

$STR.\exists$ **UND** $STR.t_{\text{letzter_Aufenthalt}}^L$ kürzlich **UND**

$\left(\neg FH.\exists \text{ ODER } \left(FH.t_{HW}^L \text{ hinten_fern ODER}_{BS} \left(FH.t_{HW}^L \text{ hinten_nah UND} \left(FH.t_{TC}^L \text{ mo-} \right. \right. \right. \right.$
 $\left. \left. \left. \text{derat_beeinflusst ODER } FH.t_{TC}^L \text{ unbeeinflusst} \right) \right) \right) \text{ UND}$
 $\left(\neg FV.\exists \text{ ODER } \left(FV.t_{HW}^L \text{ vorne_fern ODER}_{BS} \left(FV.t_{HW}^L \text{ vorne_nah UND } \left(FV.t_{TC}^L \text{ mode-} \right. \right. \right. \right.$
 $\left. \left. \left. \text{rat_beeinflusst ODER } FV.t_{TC}^L \text{ unbeeinflusst} \right) \right) \right) \right)$

DANN FSW_aL_p2^L durchführbar

Die Definitionen der einzelnen in den Regeln verwendeten linguistischen Situationsmerkmale der Fahrstreifen finden sich in den Tabellen 5.4 und 5.5, in denen die zugrunde liegenden scharfen Größen beschrieben sind. Zusätzlich werden in Tabelle 7.3 die Definitionen sämtlicher verwendeter Variablen im Überblick gezeigt. Die Operatoren „UND“ sowie „ODER“ sind in Definition A.1 definiert.

Symbol	Bedeutung	Einheit
STA	Aktueller Fahrstreifen	-
STL	Fahrstreifen links	-
STR	Fahrstreifen rechts	-
FVL	Fahrzeug vorne links	-
FSL	Fahrzeug seitlich links	-
FHL	Fahrzeug hinten links	-
FV	Fahrzeug vorne	-
FH	Fahrzeug hinten	-
$STL.\exists$	Existenz des linken Fahrstreifens	1
$FSL.\exists$	Existenz des Fahrzeuges seitlich links	1
$FHL.\exists$	Existenz des Fahrzeuges hinten links	1
$FHL.t_{HW}^L$	Linguistische Variable der Zeitlücke zum Fahrzeug hinten links	-
$FHL.t_{TC}^L$	Linguistische Variable der Time to Collision zum Fahrzeug hinten links	-
$FVL.\exists$	Existenz des Fahrzeuges vorne links	1
$FVL.t_{HW}^L$	Linguistische Variable der Zeitlücke zum Fahrzeug vorne links	-
$FVL.t_{TC}^L$	Linguistische Variable der Time to Collision zum Fahrzeug vorne links	-
$STA.\Delta y_F^L$	Linguistische Variable der lateralen Abweichung der Eigenfahrzeugmitte von der Fahrstreifenmitte des aktuellen Fahrstreifens	-
$STA.\Delta \psi_F^L$	Linguistische Variable der Gierwinkelabweichung des Eigenfahrzeuges von der Tangente an den aktuellen Fahrstreifen	-
$STR.\exists$	Existenz des rechten Fahrstreifens	1
$STR.t_{\text{letzter_Aufenthalt}}^L$	Linguistische Variable der Zeit seit letztem Aufenthalt des Eigenfahrzeuges auf dem rechten Fahrstreifen	-
$FH.\exists$	Existenz des Fahrzeuges hinten	1
$FH.t_{HW}^L$	Linguistische Variable der Zeitlücke zum Fahrzeug hinten	-
$FH.t_{TC}^L$	Linguistische Variable der Time to Collision zum Fahrzeug hinten	-
$FV.\exists$	Existenz des Fahrzeuges vorne	1
$FV.t_{HW}^L$	Linguistische Variable der Zeitlücke zum Fahrzeug vorne	-
$FV.t_{TC}^L$	Linguistische Variable der Time to Collision zum Fahrzeug vorne	-

Tabelle 7.3: Übersicht der in den Regeln zur Bestimmung der Durchführbarkeit des Manövers „Fahrstreifen wechseln“ verwendeten Variablen

Die Definition der Operatoren \neg und „ ODER_{BS} “ ist gegeben durch:

Definition 7.1. Fuzzy Operatoren \neg und „ ODER_{BS} “:

$$\begin{aligned}\neg & : \mu_{\neg} = 1 - \mu_a \\ \text{ODER}_{BS} & : \mu_{\text{ODER}_{BS}} = \min(\mu_a + \mu_b, 1)\end{aligned}$$

Durch das Zusammenwirken der den jeweiligen Phasen zugeordneten Regeln wird die kontinuierliche Handlungsgenerierung für den Fahrstreifenwechsel durch die Bearbeitungsebenen (Kurzzeit-) Trajektorienplanung und Steuerung / Regelung während der Ausführung des Manövers gesteuert. Durch die Regeln wird vor der Ausführung festgestellt, ob ein Fahrstreifenwechsel initiiert werden kann. Während der Ausführung wird überprüft, ob die Ausführung fortgesetzt werden kann und ob das Manöver abgeschlossen ist (siehe Kapitel 6.1.2.2).

Bevor der Fahrstreifenwechsel ausgeführt wird und während der ersten Phase der Ausführung des Manövers (das Eigenfahrzeug befindet sich auf dem Startfahrstreifen) ist die Regel $R\text{-FSW-L1}_d$ zuständig für die Prüfung, ob das Manöver initiiert und ob es fortgesetzt werden kann. Durch die Regel wird festgestellt, ob der Zielfahrstreifen vorhanden ist und ob die Belegung des Zielfahrstreifens durch andere Fahrzeuge (FHL und FVL) den Fahrstreifenwechsel erlaubt.

Nach dem Überfahren der Fahrstreifenbegrenzung zum Zielfahrstreifen ist die der zweiten Phase zugeordnete Regel $R\text{-FSW-L2}_d$ zuständig für die Prüfung, ob das Manöver fortgesetzt werden kann und ob es abgeschlossen ist. Durch die in der Regel enthaltene Feststellung, ob sich das Eigenfahrzeug in der zweiten Phase der Ausführung eines Fahrstreifenwechsels befindet, wird einerseits gewährleistet, dass die Regel nur in der zweiten Phase des Manövers aktiv werden kann. Andererseits erfolgt dadurch die Prüfung, ob das Manöver abgeschlossen ist. Des Weiteren wird in $R\text{-FSW-L2}_d$ überprüft, ob die Belegung des Zielfahrstreifens durch andere Fahrzeuge (FH und FV) gegebenenfalls die weitere Ausführung erlaubt.

Die Steuerung des Manöverablaufes wird alleine durch die beiden unabhängigen Regeln realisiert. Die Regeln betrachten ausschließlich die aktuell vorliegende Situation. Es wird kein Wissen über einen in zurückliegenden Rechenzyklen erreichten Ablaufgrad oder Zustand des Manövers verwendet. Derartiges Wissen ist für die kooperative Automation nicht verwendbar, da durch die gemeinsame Handlungsausführung von Fahrer und Automation nicht davon ausgegangen werden kann, dass ein Manöver, wie es von der Automation geplant wurde, auch vom Fahrzeug ausgeführt wird. Da der Fahrer ebenfalls auf die Steuerung des Fahrzeuges einwirkt, kann sich der ausgeführte Fahrstreifenwechsel deutlich von dem von der Automation geplanten Fahrstreifenwechsel unterscheiden. Des Weiteren kann dadurch ein gänzlich anderes Manöver als der Fahrstreifenwechsel vom Fahrzeug ausgeführt werden. Die notwendige Flexibilität der Automation wird durch die unabhängigen Regeln erreicht (siehe Kapitel 6.1.2.2).

Ein weiterer Grund für die gewählte Formulierung der Regeln liegt in der Anforderung, in jeder Situation sämtliche für die Automation durchführbaren Manöver zu bestimmen (siehe Kapitel 6.1.2.2). Bei einem Manöver wie dem Fahrstreifenwechsel, das über einen definierten Anfang und ein definiertes Ende verfügt, bedeutet dies, dass nicht nur vor Beginn des Manövers erkannt werden muss, dass es durchführbar ist, sondern dass dies auch während der Ausführung des Manövers zu erkennen ist. Dadurch ist gewährleistet, dass die Automation einen vom Fahrer initiierten Fahrstreifenwechsel zu Ende ausführen kann.

Um bei der Prüfung der Belegung des Zielfahrstreifens Kompatibilität zum Fahrer zu erreichen, liegen den entsprechenden Teilen der linguistischen Regeln sowie den Zugehörigkeitsfunktionen der linguistischen Werte Ergebnisse aus Analysen des Fahrverhaltens von Fahrern zugrunde (siehe Kapitel 6.1.2.2 und Kapitel 4.4). Hier bieten zum Beispiel die Arbeiten von Ehmanns [55], Fastenmeier et al. [61] und Lee et al. [122] detaillierte Aussagen.

Der Aufbau der linguistischen Regeln begründet sich durch das in diesen Arbeiten festgestellte Entscheidungsverhalten des Fahrers, ob ein Fahrstreifenwechsel für ihn durchführbar ist. Dieses Entscheidungsverhalten des Fahrers lässt sich basierend auf der **Time to Collision** (TTC) und den Zeitlücken zu den Fahrzeugen auf dem Zielfahrstreifen modellieren [55, 61]. Ist die Zeitlücke t_{HW} hinreichend groß, so genügt dieses Kriterium. Bei kleineren Zeitlücken t_{HW} muss außerdem die TTC t_{TC} eine genügende Größe aufweisen, damit ein Fahrer einen Fahrstreifenwechsel durchführt [55, 61]. Dieses Prinzip gilt für das hintere Fahrzeug auf dem Zielfahrstreifen (*FHL*) ebenso wie für das vordere Fahrzeug auf dem Zielfahrstreifen (*FVL*).

Um die Zugehörigkeitsfunktionen der linguistischen Werte für die Zeitlücke t_{HW} sowie die TTC t_{TC} zu den Fahrzeugen auf den Nachbarfahrstreifen festzulegen (siehe Abbildung 7.5), werden die in den genannten Arbeiten statistisch ermittelten Werte für diese Einflussgrößen zugrunde gelegt. Die Ergebnisse der Arbeiten hinsichtlich dieser Werte werden im Folgenden kurz vorgestellt.

Die Fahrer akzeptieren bezüglich des Vorderfahrzeuges auf dem Zielfahrstreifen deutlich geringere TTCs als bezüglich des Hinterfahrzeuges [55]. Dieses Verhalten wird in den ermittelten Zahlenwerten der Studien für die von Fahrern akzeptierten TTCs deutlich.

Lee et al. [122] betrachten einen Fahrstreifenwechsel nach links. Sie stellen fest, dass das fünfte Perzentil der Werte für die TTC zum hinteren linken Fahrzeug bei 5,6 s liegt (95 % der gemessenen TTCs liegen oberhalb von 5,6 s). Der minimale Wert ihrer Messungen bezüglich dieses Fahrzeuges liegt bei 3 s. Für das Vorderfahrzeug auf dem Zielfahrstreifen liegt das fünfte Perzentil bei 4,3 s, das Minimum ist hier 2,6 s.

Ehmanns [55] findet einen minimalen Wert für die TTC zum hinteren Fahrzeug auf dem Zielfahrstreifen von 2,4 s, bei einer Vielzahl der Probanden auch einen minimalen Wert von über 3 s. Zum vorderen Fahrzeug werden „häufig sogar TTC um 0,8 s zugelassen“ [55, S.81]. Die häufigsten gemessenen TTCs zum hinteren Fahrzeug auf dem Zielfahrstreifen liegen bei ca. 4 bis 5 s, zum vorderen Fahrzeug bei ca. 3 s.

Die minimal akzeptierten Zeitlücken der einzelnen Probanden zum Vorderfahrzeug auf dem Zielfahrstreifen unterscheiden sich nach Ehmanns [55] kaum. In den Studie treten minimale Werte von 0,3 s auf. Eine größere Streuung ergibt sich in den minimalen Zeitlücken zum Hinterfahrzeug auf dem Zielfahrstreifen. Einige Probanden akzeptieren Zeitlücken bis 0,3 s, andere hingegen nur bis zu 1,7 s.

Fastenmeier et al. [61] definieren aufgrund der Ergebnisse ihrer Studie (1095 Fahrstreifenwechselmanöver) kritische Fahrstreifenwechselmanöver mittels der Zeitlücke und der TTC (siehe oben): Das Manöver ist unkritisch, wenn die Zeitlücken zum Vorder- und Hinterfahrzeug auf dem Zielfahrstreifen größer als 1,2 s sind. Ist eine Zeitlücke im Bereich zwischen 0,6 s und 1,2 s, so ist das Manöver noch unkritisch, wenn außerdem die TTC einen Wert von über 3 s aufweist, andernfalls ist es kritisch.

Ehmanns [55] definiert aufgrund seiner Ergebnisse in dem von ihm entwickelten Fahrermodell einen durchführbaren Fahrstreifenwechsel wie folgt: Zum Hinterfahrzeug auf dem Zielfahrstreifen muss die Zeitlücke mindestens 3 s betragen. Ist sie zwischen 0,3 s und 3 s, so muss die TTC einen Wert von mindestens 5 s aufweisen. Bezüglich des Vorderfahrzeuges auf dem Zielfahrstreifen muss die Zeitlücke mindestens dem unteren Folgeabstand entsprechen. Dieser entspricht der unteren Zielzeitlücke bei dem Manöver „Fahrzeug folgen“. Unterschreitet die Zeitlücke diesen Wert, so muss die TTC ebenfalls mindestens 5 s betragen. Ist die Zeitlücke kleiner als 0,3 s, so ist der Fahrstreifenwechsel nicht mehr durchführbar.

Basierend auf den vorgestellten Ergebnissen werden die Zugehörigkeitsfunktionen der linguistischen Werte für t_{HW} und t_{TC} zu den Fahrzeugen auf den Nachbarfahrstreifen erstellt. Abbildung 7.5 zeigt diese Zugehörigkeitsfunktionen.

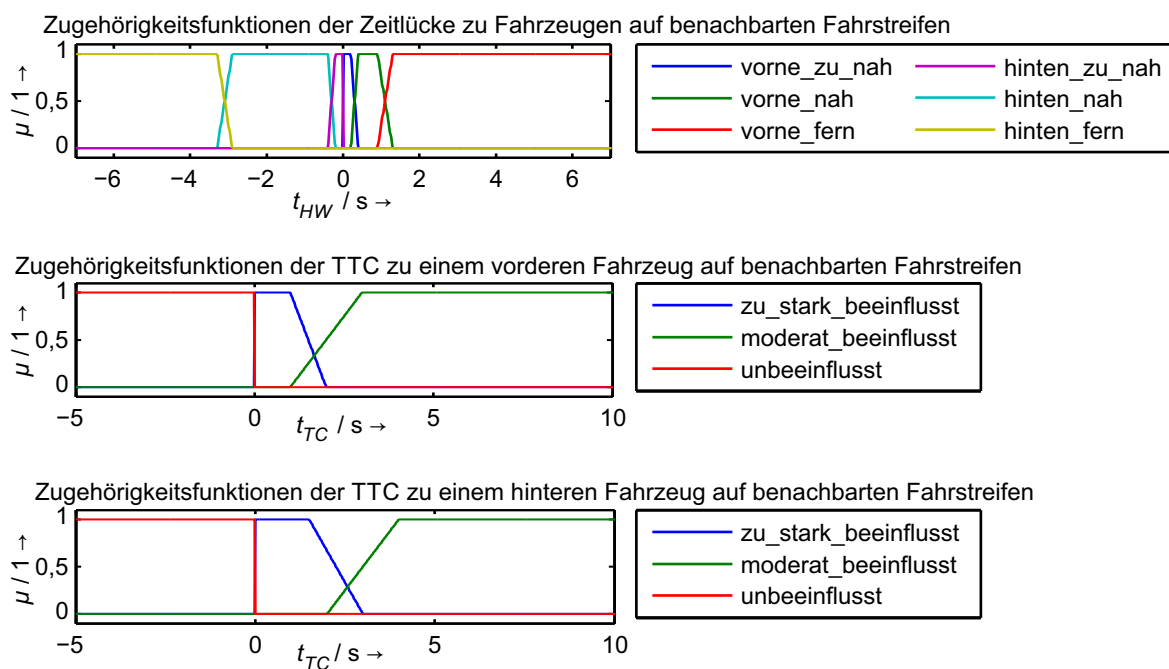


Abbildung 7.5: Zugehörigkeitsfunktionen der linguistischen Werte für t_{HW} und t_{TC} zu Fahrzeugen auf den Nachbarfahrstreifen

7.4 Anforderungen an einen Trajektorienplanungsalgorithmus

Auf der Bearbeitungsebene (Kurzzeit-) Trajektorienplanung benötigt die kooperative Automation die Fähigkeit, eine Trajektorie für die Ausführung des Manövers „Fahrstreifen wechseln“ zu planen (siehe Kapitel 5.1). Die Realisierung dieser Fähigkeit erfordert einen Trajektorienplanungsalgorithmus, der die im Folgenden dargestellten Anforderungen erfüllt. Diese Anforderungen ergeben sich aus den in den vorigen Kapiteln vorgestellten Elementen der Modellierung des Manövers „Fahrstreifen wechseln“ (Kapitel 7.1, 7.2 und 7.3) sowie aus der allgemeinen Modellierung der Manöver im Rahmen der manöverbasierten Umsetzung der kooperativen Automation (siehe Kapitel 5.1). Des

Weiteren resultieren die Anforderungen aus der Umsetzung der Kooperation ausmachenden Elemente Kompatibilität, gemeinsame Handlungsplanung und gemeinsame Handlungsausführung.

Zunächst wird der durch den Trajektorienplanungsalgorithmus zu adressierende Situationsraum betrachtet. Dieser ergibt sich aus der Definition des Manövers „Fahrstreifen wechseln“ (siehe Kapitel 7.1). Der Trajektorienplanungsalgorithmus soll daher eine Trajektorie für einen Fahrstreifenwechsel planen können, deren Umfang auf den eigentlichen Fahrstreifenwechsel begrenzt ist. Beispiele für beim Abfahren derartiger Trajektorien erzeugte Bahnen des Fahrzeugschwerpunktes zeigen die Abbildungen 7.1 und 7.2. Die in Kapitel 7.2 erläuterten Ausprägungen, Anlässe und Phasen (siehe Tabelle 7.1) des Manövers „Fahrstreifen wechseln“, die dessen Definition detaillieren, müssen durch den Trajektorienplanungsalgorithmus abgedeckt werden. Hinsichtlich der Anlässe ist besonders die geforderte Bandbreite von unkritischen Fahrstreifenwechselsituationen bis hin zum Notausweichen zu erwähnen. Neben der Berücksichtigung eines Vorderfahrzeuges auf dem Startfahrstreifen ist ebenso ein sich auf dem Zielfahrstreifen befindliches Fahrzeug zu beachten, welches das neue Vorderfahrzeug des Eigenfahrzeuges nach Übertreten der Fahrstreifenbegrenzung wird (zur Benennung der Fahrstreifen siehe Abbildung 7.1).

Durch die auf der Bearbeitungsebene Manöverplanung mittels der linguistischen Regeln durchgeführte Bestimmung, ob der Fahrstreifenwechsel durchführbar ist (siehe Kapitel 7.3), gilt für den Trajektorienplanungsalgorithmus die Annahme, dass die Durchführung eines Fahrstreifenwechsels in der vorliegenden Situation möglich ist. Demzufolge muss zunächst keine weitere Prüfung der Durchführbarkeit erfolgen. Aus dieser Struktur ergibt sich des Weiteren die Anforderung, dass der Trajektorienplanungsalgorithmus, um Konsistenz bei der Handlungsgenerierung zu gewährleisten, eine Trajektorie in der Gesamtheit der Situationen generieren können muss, in denen durch die linguistischen Regeln die Durchführbarkeit des Fahrstreifenwechsels festgestellt wurde.

Neben der Anforderung, für den beschriebenen Situationsumfang sichere und realisierbare Trajektorien zu generieren, gilt für den Trajektorienplanungsalgorithmus darüber hinaus die Kompatibilitätsforderung. Dies bedeutet, dass eine vom Algorithmus geplante Trajektorie zu einer von einem Fahrer erzeugten Trajektorie bei Durchführung eines Fahrstreifenwechsels kompatibel sein muss. Die Kompatibilität muss sich in der Form der Trajektorie sowie in den durch sie realisierten Werten der für das Manöver relevanten Fahrstilparameter (zum Beispiel maximale Querschleunigung, maximaler longitudinaler Ruck) zeigen. Zur Umsetzung der Fahrstile müssen dabei die manöverspezifischen Fahrstilparameter der Automation $P_{F, Automation}^m$ beachtet werden.

Die mittels der expliziten Kommunikation mit dem Fahrer von der Interaktionsumsetzung festgelegten Fahrstilparameter $P_{F, Interaktion}^m$ müssen ebenfalls vom Trajektorienplanungsalgorithmus auf die in Kapitel 5.1.1 beschriebene Weise berücksichtigt werden. Im Gegensatz zu den Fahrstilparametern der Automation können sich diese Fahrstilparameter zur Systemlaufzeit häufig ändern. Der Algorithmus muss daher dahingehend robust ausgelegt sein. Außerdem muss es der Trajektorienplanungsalgorithmus ermöglichen, einen hinreichend großen Wertebereich bei verschiedenen Fahrstilparametern berücksichtigen zu können. Der zu berücksichtigende Wertebereich ergibt sich aus der Kompatibilitätsforderung. Es wäre nicht kompatibel, wenn es für den Fahrer lediglich möglich ist, mittels der expliziten Kommunikation die Veränderung des Wertes eines Fahrstilparameters in einem sehr eingeschränkten Wertebereich zu veranlassen. Es muss vielmehr möglich sein, den von einem Fahrer erwarteten zugelassenen Wertebereich möglichst vollständig abzudecken und für

die Gesamtheit der zugelassenen Werte sinnvolle sowie kompatible Trajektorien zu erzeugen. Ein Beispiel ist der zu berücksichtigende Wertebereich der Zielgeschwindigkeit. Die Zielgeschwindigkeit ist die Geschwindigkeit, welche die Automation erreichen möchte, wenn sie unbeeinflusst von beispielsweise anderen Fahrzeugen, der Geometrie der Fahrbahn oder Geschwindigkeitsbeschränkungen eine Trajektorie planen kann. Hier soll ein Wertebereich von sehr geringen Geschwindigkeiten bis hin zu sehr großen Geschwindigkeiten ermöglicht werden.

Aufgrund der Involviertheit des Fahrers in die Fahrzeugführung durch die gemeinsame Handlungsausführung und Handlungsplanung kann nicht davon ausgegangen werden, dass ein begonnenes Manöver auch zu Ende ausgeführt wird. Der Trajektorienplanungsalgorithmus darf daher nicht von der Annahme ausgehen, dass eine geplante Trajektorie umgesetzt wird.

Abschließend wird die für die Ausführung des Algorithmus benötigte Rechenzeit betrachtet. Diese muss es ermöglichen, in einem Rechenzyklus der Bearbeitungsebene (Kurzzeit-) Trajektorienplanung sämtliche Trajektorien für die im Manöverbaum vorhandenen durchführbaren Manöver zu erzeugen, um so das Trajektorienvallentfeld vollständig aufbauen zu können (siehe zum Beispiel Kapitel 4.3.2). Konkret bedeutet dies hinsichtlich der für den Algorithmus benötigten maximalen Rechenzeit: Durch die Addition der benötigten Rechenzeiten bei mehreren gleichzeitig durchführbaren Fahrstreifenwechselmanövern in Addition mit den benötigten Rechenzeiten der für die übrigen durchführbaren Manöver genutzten Trajektorienplanungsalgorithmen muss eine hinreichend geringe Zykluszeit für die Bearbeitungsebene (Kurzzeit-) Trajektorienplanung gewährleistet werden.

7.5 Zusammenfassung des Kapitels

In diesem Kapitel wurden exemplarisch einige Aspekte der Modellierung des Manövers „Fahrstreifen wechseln“ vorgestellt. Für die Modellierung dieses Manövers erfolgte die Anwendung der in Kapitel 5.1 dargestellten allgemeinen Modellierung der Manöver im Rahmen der manöverbasierten Umsetzung der kooperativen Automation. Ein besonderer Fokus bei den im Rahmen dieses Kapitels vorgestellten Überlegungen zum Manöver „Fahrstreifen wechseln“ lag auf der Umsetzung des Kooperation ausmachenden Elementes Kompatibilität.

Zunächst wurde das Manöver „Fahrstreifen wechseln“ definiert. Darauf aufbauend wurden die Elemente der Modellierung des Manövers auf der Bearbeitungsebene Manöverplanung beschrieben, die über eine spezialisierte Definition für das Manöver „Fahrstreifen wechseln“ verfügen. Diese Elemente sind die Ausprägung, die Phase und der Anlass des Manövers. Im Anschluss wurde die Modellierung der von der kooperativen Automation benötigten Fähigkeiten zur Manöverplanung für das Manöver „Fahrstreifen wechseln“ vorgestellt. Es erfolgte dazu basierend auf der in Kapitel 6.1 beschriebenen Methode die Beschreibung der Bestimmung der Wahrscheinlichkeit, mit der das Manöver als aktuell gefahrenes infrage kommt, sowie der Bestimmung der Durchführbarkeit des Manövers. Abschließend wurden Anforderungen an einen Algorithmus beleuchtet, der in der Lage ist, die von der kooperativen Automation benötigte Fähigkeit der Trajektorienplanung für die Ausführung des Manövers „Fahrstreifen wechseln“ zu realisieren.

Die in diesem Kapitel vorgestellten Überlegungen verdeutlichen somit anhand des Manövers „Fahrstreifen wechseln“ die in Kapitel 5.1 beschriebene neuartige allgemeine Modellierung der Manö-

ver sowie die in Kapitel 6.1 dargestellte neuartige Methode zur Umsetzung der Manöverplanung und zeigen ihre praktische Anwendbarkeit auf. Damit liefert dieses Kapitel einen Beitrag zur Beantwortung der zweiten zentralen Fragestellung dieser Arbeit „Welche Konzepte und Methoden eignen sich für die technische Umsetzung der kooperativen Automation für das teil- und hochautomatisierte Fahren?“. Bei den im Rahmen des folgenden Kapitels 8 gezeigten Ergebnissen aus Evaluierungen der kooperativen Automation werden unter anderem Ergebnisse dargestellt, die das Manöver „Fahrstreifen wechseln“ adressieren.

Die folgende Tabelle 7.4 gibt abschließend eine Kurzzusammenfassung des vorliegenden Kapitels 7.

Inhalt des Kapitels
<ul style="list-style-type: none"> • Exemplarische Vorstellung ausgewählter Aspekte der Modellierung des Manövers „Fahrstreifen wechseln“ unter Anwendung der in Kapitel 5.1 dargestellten allgemeinen Modellierung der Manöver • Definition des Manövers „Fahrstreifen wechseln“ • Beschreibung der Elemente der Modellierung des Manövers „Fahrstreifen wechseln“ auf der Bearbeitungsebene Manöverplanung • Modellierung der von der kooperativen Automation benötigten Fähigkeiten zur Manöverplanung: Bestimmung der Wahrscheinlichkeit, mit der das Manöver als aktuell gefahrenes infrage kommt sowie Bestimmung der Durchführbarkeit des Manövers • Beleuchtung von Anforderungen an einen Trajektorienplanungsalgorithmus für das Manöver „Fahrstreifen wechseln“
Beitrag zum Stand der Technik
<ul style="list-style-type: none"> • Verdeutlichung und Aufzeigen der praktischen Anwendbarkeit der in Kapitel 5.1 beschriebenen neuartigen allgemeinen Modellierung der Manöver anhand des Manövers „Fahrstreifen wechseln“ • Verdeutlichung und Aufzeigen der praktischen Anwendbarkeit der in Kapitel 6.1 dargestellten, neuartigen Methode zur Umsetzung der Manöverplanung anhand des Manövers „Fahrstreifen wechseln“
Stand bezüglich der Fragestellungen der Arbeit
<p>Fragestellung 2: „Welche Konzepte und Methoden eignen sich für die technische Umsetzung der kooperativen Automation für das teil- und hochautomatisierte Fahren?“</p> <p>Erreichter Stand hinsichtlich der Beantwortung der Fragestellung 2:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Allgemeine Modellierung der Manöver (siehe Kapitel 5.1) wurde verdeutlicht und ihre praktische Anwendbarkeit aufgezeigt; damit wird ein Beitrag zur detaillierteren Beantwortung der Fragestellung geliefert • Methode zur Umsetzung der Manöverplanung (siehe Kapitel 6.1) wurde verdeutlicht und ihre praktische Anwendbarkeit aufgezeigt; damit wird ein Beitrag zur detaillierteren Beantwortung der Fragestellung geliefert <p>Offen zur vollständigen Beantwortung der Fragestellung 2:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Technische Evaluierung hinsichtlich der Erfüllung der avisierten Funktionalität → Kapitel 8

Tabelle 7.4: Kurzzusammenfassung von Kapitel 7

8 Entwicklungsprozess und Evaluierungen der kooperativen Automation

Nachdem in den vorherigen Kapiteln das Konzept der kooperativen Automation, dessen technische Konkretisierung sowie diverse Konzepte und Methoden zur Umsetzung vorgestellt wurden, fokussiert dieses Kapitel auf den angewendeten iterativen Entwicklungsprozess und die Evaluierungen der kooperativen Automation.

Die Evaluierungen zielen generell auf die Überprüfung des Konzeptes der kooperativen Automation und der im Rahmen dieser Arbeit umgesetzten Bearbeitungsebenen hinsichtlich der Fragestellungen und Zielsetzungen der Arbeit ab. Es werden insbesondere die Kooperation ausmachenden Elemente Kompatibilität, gemeinsame Handlungsplanung, gemeinsame Handlungsausführung, mentale Modelle, Kommunikation sowie Rolle und Entscheidungsspielraum in den Mittelpunkt gestellt (siehe Kapitel 3.2 und Tabelle C.1).

Die weitere Klarstellung des Fokus der Evaluierungen erfolgt anhand des generellen Fokus der vorliegenden Arbeit. Wie bereits in Kapitel 1.4 erläutert wurde (siehe auch Abbildung 1.2), zielt die Arbeit auf die Automationsfunktionalität ab. Die Zielsetzung hinsichtlich der Mensch-Maschine-Schnittstelle ist daher die Beschreibung von Konzepten und Methoden zur Bereitstellung verschiedenster Kommunikationsmöglichkeiten, nicht die konkrete Ausgestaltung der Mensch-Maschine-Schnittstelle. Der skizzierte Fokus wird nun weiter präzisiert unter Nutzung der in dieser Arbeit entwickelten Konzepte und Begrifflichkeiten (siehe Abbildung 8.1): Die im Fokus stehende Automationsfunktionalität umfasst die Bearbeitungsebenen der kooperativen Automation mit den dazugehörigen Kommunikationskanälen. Anstelle des Begriffs „Mensch-Maschine-Schnittstelle“ wurde in der vorliegenden Arbeit der Begriff „Interaktionsumsetzung“ eingeführt (siehe Kapitel 4.2.2.7). Dadurch soll deutlich gemacht werden, dass sowohl die Ausgestaltung der Oberfläche der Mensch-Maschine-Schnittstelle als auch die grundsätzliche Gestaltung der Interaktion von kooperativer Automation und Fahrer in diesem Modul umgesetzt werden. Der Fokus der Evaluierungen liegt somit auf der Automationsfunktionalität, nicht auf der Interaktionsumsetzung.

Im Weiteren wird zunächst ausführlich auf den angewendeten iterativen Entwicklungsprozess eingegangen sowie eine Gesamtübersicht der in dessen Rahmen durchgeführten Evaluierungen gegeben (Kapitel 8.1). Dabei werden die sich aus der Gesamtbetrachtung der durchgeführten Evaluierungen ergebenden Schlüsse für die Fragestellungen und Zielsetzungen dieser Arbeit erläutert. Außerdem wird die für diese stetigen Evaluierungen notwendige prototypische Implementierung der kooperativen Automation und deren Integration in verschiedene Fahrsimulatoren und Versuchsfahrzeuge thematisiert. Aus der großen Anzahl an durchgeführten Evaluierungen wurden zur detaillierten Ergebnisvorstellung vier Evaluierungen ausgewählt. Diese werden im Anschluss dargestellt. Kapitel 8.2 stellt die Ergebnisse einer technischen Evaluierung vor, Kapitel 8.3 die Ergebnisse von drei Usability Untersuchungen mit Probanden.

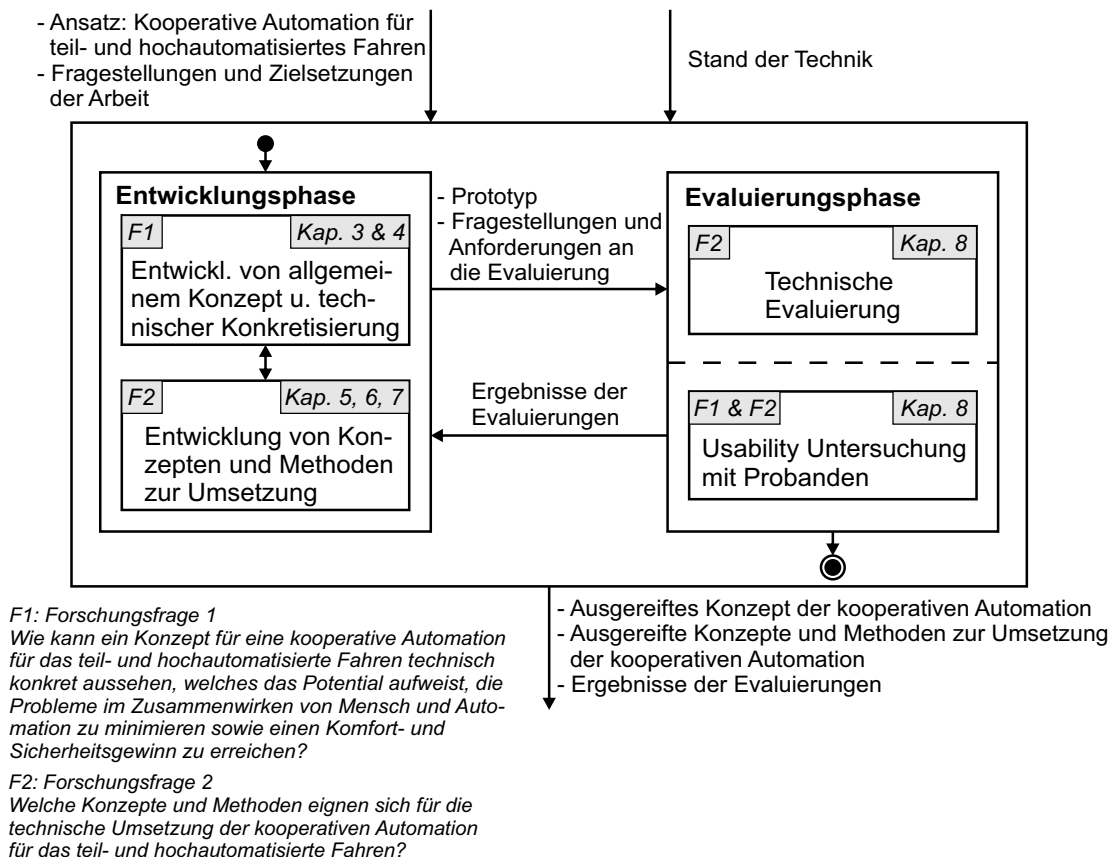


Abbildung 8.2: Iterativer Entwicklungsprozess mit Benennung der in den Arbeitsschritten adressierten Forschungsfragen und Zuordnung der Arbeitsschritte zu den Kapiteln dieser Arbeit

insbesondere bei einem komplexen System, wie dem in dieser Arbeit entwickelten, von Vorteil, um die Ursache eventuell auftretender Probleme gut eingrenzen zu können.

8.1.1 Entwicklungsphase

Den Startpunkt des Entwicklungsprozesses (siehe Abbildung 8.2) bildet die initiale Entwicklungsphase, in der eine erste Version des allgemeinen Konzeptes der kooperativen Automation, seiner technischen Konkretisierung sowie der Konzepte und Methoden zur Umsetzung erarbeitet wird. In dieser ersten, wie auch in jeder darauffolgenden Entwicklungsphase, erfolgt eine eng verknüpfte Entwicklung sowohl des allgemeinen Konzeptes und seiner technischen Konkretisierung als auch der Konzepte und Methoden zur Umsetzung. Dies ist notwendig, da einerseits das allgemeine Konzept und seine technische Konkretisierung die Grundlage der Konzepte und Methoden zur Umsetzung bilden. Andererseits können auch Erkenntnisse bei der Umsetzungsentwicklung einen Einfluss in die entgegengesetzte Richtung haben und so zum Beispiel Änderungen oder Erweiterungen des allgemeinen Konzeptes und seiner technischen Konkretisierung bewirken.

Am Ende einer Entwicklungsphase wird die kooperative Automation mithilfe der Konzepte und Methoden zur Umsetzung prototypisch implementiert bzw. die bestehende prototypische Implementierung wird angepasst und erweitert. Außerdem erfolgt die Integration der prototypischen Implementierung in einen Simulator oder ein Versuchsfahrzeug, um einen vollständigen Prototypen zu

bieten. Die Beschreibung der genutzten Fahrsimulatoren und Versuchsfahrzeuge erfolgt in Anhang B.1.

Die Implementierung der kooperativen Automation basiert auf der am Institut für Verkehrssystemtechnik des DLR entstandenen Entwicklungs- und Laufzeitumgebung DOMINION (siehe [72]). DOMINION gewährleistet sowohl eine strukturierte Entwicklung als auch den Betrieb prototypischer Systemimplementierungen in sämtlichen Versuchsplattformen des Institutes. Durch die einheitliche DOMINION-Laufzeitumgebung kann die Implementierung der kooperativen Automation in jeder dieser Versuchsplattformen betrieben werden, wodurch eine schnelle Entwicklung von der Simulation hin zum Versuchsfahrzeug ermöglicht wird.

Zur Gewährleistung der Sicherheit während der Versuchsfahrten wurden neben den bereits in dieser Arbeit dargestellten Sicherheitsmechanismen verschiedene weitere in die Prototypen implementiert. Diese umfassen zum Beispiel Watchdogs zur Überprüfung der korrekten Ausführung der einzelnen umgesetzten Module im vorgegebenen Zeitrahmen sowie eine automatische Notbremsfunktionalität, die bei Verlassen von definierten befahrbaren Bereichen oder einer potentiell gefährlichen Annäherung an ein anderes Objekt das Fahrzeug zum Stillstand bringt.

Neben der Erstellung eines Prototypen werden am Ende einer Entwicklungsphase die in der folgenden Evaluierungsphase zu klärenden Fragestellungen sowie die daraus abgeleiteten Anforderungen an die Evaluierungen formuliert. Der Prototyp, die Fragestellungen und Anforderungen an die Evaluierung bilden die Ausgabe der Entwicklungsphase an die Evaluierungsphase.

8.1.2 Evaluierungsphase

Darauf basierend erfolgt zu Beginn einer Evaluierungsphase (siehe Abbildung 8.2) die Konzipierung der Evaluierungen. Dabei wird auch die Entscheidung getroffen, inwiefern technische Evaluierungen oder Usability Untersuchungen mit Probanden eingesetzt werden müssen, um die Fragestellungen unter Berücksichtigung der Anforderungen an die Evaluierung beantworten zu können. Die Durchführung der technischen Evaluierungen und der Usability Untersuchungen mit Probanden erfolgen im Weiteren unabhängig voneinander.

Im Zentrum der Evaluierungen stehen die Fragen, inwiefern die zentralen Fragestellungen dieser Arbeit bereits vollständig beantwortet werden können und inwiefern die Zielsetzungen (siehe Kapitel 1.4) bereits erfüllt werden. Des Weiteren ist der Erfüllungsgrad der an die kooperative Automation gestellten Anforderungen relevant. Sind Anforderungen bereits vollständig erfüllt, kann die dahingehende Entwicklungstätigkeit abgeschlossen werden. Sind Anforderungen noch nicht erfüllt, kann die weitere Entwicklung zielgerichtet dahingehend gesteuert werden. Hierbei ist es wichtig, klar zu ermitteln, in welchen Bereichen genau noch Defizite bestehen. Darüber hinaus können sich in Evaluierungen auch neue Anforderungen ergeben, die in der weiteren Entwicklung adressiert werden müssen. Diese neuen Anforderungen können sich zum Beispiel in neu aufgetretenen Problemen begründen. Ergeben sich in mehreren Evaluierungen gleiche Ergebnisse bezüglich einer bestimmten Fragestellung, Zielsetzung oder Anforderung, so steigt die Signifikanz dieses Ergebnisses. Die Ergebnisse der Evaluierungen bilden die Ausgabe der Evaluierungsphase an die folgende Entwicklungsphase oder an den Abschluss der vorliegenden Arbeit.

Zur Gewährleistung der Sicherheit während der Versuchsfahrten wurden bei der Strecken- und Szenariengestaltung ausreichende Auslaufflächen unter Berücksichtigung der Gegebenheiten des genutzten Testgeländes eingeplant. Darüber hinaus erfolgten sämtliche Fahrten in Begleitung eines besonders ausgebildeten und mit dem aufgebauten System vertrauten Experimentalfahrers, der jederzeit über weitreichende Eingriffsmöglichkeiten in die Fahrzeugsteuerung verfügte.

Die Ziele und Eigenschaften der technischen Evaluierungen sowie der Usability Untersuchungen mit Probanden unterscheiden sich. Im Folgenden werden diese detaillierter aufgeschlüsselt.

Technische Evaluierungen

Die technischen Evaluierungen (siehe Abbildung 8.2) zielen ausschließlich auf die Überprüfung der technischen Umsetzbarkeit des Konzeptes und der Funktionalität der Umsetzung ab. Sie adressieren damit die zweite zentrale Fragestellung dieser Arbeit „Welche Konzepte und Methoden eignen sich für die technische Umsetzung der kooperativen Automation für das teil- und hochautomatisierte Fahren?“. Sie erfolgen unter Nutzung von Fahrsimulatoren und Versuchsfahrzeugen. Ein eingewiesener Testfahrer übernimmt die Bedienung der kooperativen Automation. In den einzelnen technischen Evaluierungen werden gezielt verschiedene Teilfunktionalitäten und Manöver in verschiedenen Szenarien getestet. Diese werden anhand der zu klärenden Fragestellungen sowie den Anforderungen an die Evaluierung, die in der Entwicklungsphase formuliert wurden, ausgewählt. Besonders im Fokus stehen dabei jeweils die in der vorangegangenen Entwicklungsphase weiter- oder neuentwickelten Bestandteile der kooperativen Automation.

Im Vergleich zu Usability Untersuchungen mit Probanden bieten sich diverse Vorteile: Die Testszenarien sind sehr gut reproduzierbar, da der Testfahrer das Fahrzeug und die kooperative Automation wiederholbar gezielt in bestimmte Zustände bringen kann. Dies können auch Zustände sein, in die Probanden das Fahrzeug und die kooperative Automation nur sehr unwahrscheinlich bringen würden. Außerdem kann ein Testfahrer gezielt potentiell kritische Situationen herbeiführen, in die ein Proband aus Sicherheitsgründen nicht gebracht werden könnte. Auch das Verhalten an Systemgrenzen kann gezielt getestet werden. Dies ist insbesondere auch zum Aufzeigen der funktionalen Sicherheit und Zuverlässigkeit von großer Bedeutung. Abschließend bleibt anzumerken, dass Evaluierungen deutlich weniger aufwändig sind, wenn kein Probandeneinsatz benötigt wird. Die Evaluierungen sind so kostengünstiger durchzuführen und Ergebnisse stehen schneller zur Verfügung.

Usability Untersuchungen mit Probanden

Die Usability Untersuchungen mit Probanden (siehe Abbildung 8.2) adressieren vor allem die erste zentrale Fragestellung dieser Arbeit „Wie kann ein Konzept für eine kooperative Automation für das teil- und hochautomatisierte Fahren technisch konkret aussehen, welches das Potential aufweist, die Probleme im Zusammenwirken von Mensch und Automation zu minimieren sowie einen Komfort- und Sicherheitsgewinn zu erreichen?“. Sie zielen daher vorrangig auf die Überprüfung des Potentials hinsichtlich der Minimierung der Probleme im Zusammenwirken von Mensch und Automation, der Erreichung eines signifikanten Komfort- und Sicherheitsgewinnes sowie der Akzeptanz durch den Fahrer ab.

Da die konkrete Ausgestaltung der Interaktionsumsetzung einen erheblichen Einfluss auf die Wirkung der kooperativen Automation beim Fahrer hat und diese Ausgestaltung in der vorliegenden Arbeit nicht adressiert wird (siehe Kapitel 1.4, Einleitung Kapitel 8 und Abbildung 8.1), wird nicht auf allgemeingültige Aussagen hinsichtlich der genannten Aspekte abgezielt. Vielmehr liegt der Fokus hier auf der Evaluierung des Wirkpotentials der Funktionalität der kooperativen Automation unter Verwendung verschieden ausgestalteter Interaktionsumsetzungen. Bei der Auswertung der Usability Untersuchungen muss daher der Einfluss der Ausgestaltung der Interaktionsumsetzung klar vom Einfluss der Automationsfunktionalität abgegrenzt werden (siehe Abbildung 8.1), die in dieser Arbeit im Fokus steht. Aus diesem Grund ist auch die Durchführung von Untersuchungen mit verschieden ausgestalteten Interaktionsumsetzungen notwendig, um so deren Einfluss besser von dem der Automationsfunktionalität, die gleich bleibt, trennen zu können. Werden Wirkpotentiale in verschiedenen Untersuchungen mit unterschiedlich ausgestalteten Interaktionsumsetzungen festgestellt, so ergibt sich eine hohe Signifikanz für das Erreichen dieser Wirkpotentiale durch die im Fokus stehende Automationsfunktionalität.

Basierend auf der genannten ersten zentralen Fragestellung und den Zielsetzungen dieser Arbeit wurde ein Katalog von konkreten relevanten Fragestellungen für die Usability Untersuchungen mit Probanden entwickelt. Für die Studien wurden jeweils aus diesem Katalog zu klärende Fragestellungen ausgewählt. Der Fragenkatalog umfasst die folgenden Fragen:

- **Sicherheitsgewinn durch Vermeidung möglicher Probleme im Zusammenwirken von Fahrer und Automation** (zu den möglichen Problemen siehe Kapitel 1.2)
 - Wird der Aufbau eines übersteigerten Vertrauens der Probanden zur kooperativen Automation vermieden?
 - Wird die „Out-of-the-loop“ Problematik von der kooperativen Automation vermieden?
 - Wird nicht erwartungsgemäßes Verhalten von der kooperativen Automation vermieden?
 - Wird der Verlust manueller Fähigkeiten der Probanden von der kooperativen Automation vermieden?
 - Wird eine geringe Belastung der Probanden, welche Unaufmerksamkeit zur Folge hat, von der kooperativen Automation vermieden?
 - Werden ein mentaler Abstand der Probanden zur Fahraufgabe und ein daraus resultierendes vermindertes Situationsbewusstsein von der kooperativen Automation vermieden?
- **Sicherheitsgewinn durch weitere Wirkungen der Automation**
 - In welchem Maße geht die kooperative Automation auf verminderte Fähigkeiten der Probanden ein und schafft somit Redundanz?
 - In welchem Maße entlastet die kooperative Automation die Probanden bei der Erfüllung der Fahraufgabe und sorgt somit für einen Sicherheitsgewinn?
 - In welchem Maße vermeidet die kooperative Automation Unaufmerksamkeit der Probanden und dadurch verursachte kritische Fahrsituationen?

- Inwiefern beeinflusst die kooperative Automation die Kontrollierbarkeit des Fahrzeuges für die Probanden?
- Inwiefern empfinden die Probanden einen allgemeinen Sicherheitsgewinn, der durch die kooperative Automation bewirkt wird?

- **Komfortgewinn durch die Automation**

- In welchem Maße entlastet die kooperative Automation die Probanden bei der Erfüllung der Fahraufgabe und sorgt somit für einen Komfortgewinn?
- Inwiefern entwickeln die Probanden ein Wohlgefühl hinsichtlich der Handlungen der kooperativen Automation?
- Inwiefern ist eine Adaptierbarkeit des Automationsverhaltens an die Bedürfnisse der Probanden gegeben und wie wird sie von ihnen empfunden?
- Inwiefern ist eine Adaptierbarkeit des Automationseinflusses an die Bedürfnisse der Probanden gegeben und wie wird sie von ihnen empfunden?
- In welchem Maße empfinden die Probanden Freude an der partnerschaftlichen Zusammenarbeit mit der kooperativen Automation?

- **Kooperation ausmachende Elemente**

- Wird Kompatibilität erreicht?
- Inwiefern ist die gemeinsame Weiterentwicklung der Ziele und Werte gegeben und wie wird sie von den Probanden empfunden?
- Inwiefern ist der gemeinsame Aufbau des Situationsbewusstseins für die Probanden gegeben und wie wird er von ihnen empfunden?
- Inwiefern ist die gemeinsame Handlungsplanung für die Probanden gegeben und wie wird sie von ihnen empfunden?
- Inwiefern ist die gemeinsame Handlungsausführung für die Probanden gegeben und wie wird sie von ihnen empfunden?
- Inwiefern ermöglicht und fördert die kooperative Automation den Aufbau eines mentalen Modells bei den Probanden?
- Wie verständlich ist die Kommunikation mit der kooperativen Automation für die Probanden?
- Wie plausibel ist die definierte Rolle und der damit zusammenhängende Entscheidungsspielraum der kooperativen Automation für die Probanden?
- Inwiefern ist die Zustandsüberwachung gegeben und wie wird sie von den Probanden empfunden?

- **Allgemeine Fragestellungen**

- Wird die kooperative Automation von den Probanden akzeptiert?

- Wie wird der Nutzen der kooperativen Automation von den Probanden bewertet?
- Ist die Umsetzbarkeit der kooperativen Automation gegeben?

Basierend auf den ausgewählten Fragestellungen und den weiteren Anforderungen an die Evaluierung aus der Entwicklungsphase werden der Versuchsaufbau, die von den Probanden zu beantwortenden Fragen und der Auswertungsplan festgelegt. Analog zu den technischen Evaluierungen erfolgen die Usability Untersuchungen ebenfalls unter Nutzung von Fahrsimulatoren und Versuchsfahrzeugen. Es werden sowohl gezielt verschiedene Teilfunktionalitäten und Szenarien getestet als auch wiederholt gleiche Teilfunktionalitäten und Szenarien. Das Ziel dabei ist, dass alle Aspekte, die im Fokus dieser Arbeit stehen, letztendlich hinreichend oft evaluiert werden.

Aufgrund der Nutzung von Usability Untersuchungen im Rahmen des iterativen Usability Designprozesses kann die Anzahl der an den einzelnen Studien teilnehmenden Probanden und damit der Aufwand für die einzelnen Studien gering gehalten werden. So genügen nach Nielsen abhängig von den konkreten Fragestellungen in einer Usability Untersuchung häufig schon fünf Probanden (siehe [150] und [152]). In der Gesamtbetrachtung aller Untersuchungen kommen dennoch sehr viele Probanden mit dem System in Kontakt und es kann trotzdem eine insgesamt hohe Signifikanz der Aussagen erreicht werden. Daher werden für die Usability Untersuchungen jeweils mindestens sechs Probanden ausgewählt. Des Weiteren wird bei der Probandenauswahl darauf geachtet, dass ein breites Alters- und Fahrerfahrungsspektrum abgedeckt wird sowie dass die Geschlechter ausgeglichen sind.

Neben der Überprüfung der Wirkpotentiale beim Fahrer zielen die Usability Untersuchungen auch auf die Überprüfung der technischen Umsetzbarkeit des Konzeptes und der Funktionalität der Umsetzung ab. Damit wird auch die zweite zentrale Fragestellung dieser Arbeit „Welche Konzepte und Methoden eignen sich für die technische Umsetzung der kooperativen Automation für das teil- und hochautomatisierte Fahren?“ adressiert. Dies begründet sich dadurch, dass de facto jede Testfahrt hilft, eventuell bestehende Probleme in der technischen Umsetzung aufzudecken sowie die Signifikanz der die Funktionalität bestätigenden Aussagen zu erhöhen. In den Usability Untersuchungen werden viele verschiedene Szenarien wiederholt durchfahren, bei denen auch verschiedenste relevante Einzelsituationen vielfach auftreten. Die so erreichte Vielzahl der Tests ist auch zum Aufzeigen der funktionalen Sicherheit und Zuverlässigkeit von großer Bedeutung. Ein anderer Aspekt bietet eine gute Ergänzung zu den technischen Evaluierungen: Im Gegensatz zu den mit eingewiesenen Testfahrern durchgeführten und genau geplanten technischen Evaluierungen besteht bei Fahrten mit Probanden die Möglichkeit, dass die Probanden die kooperative Automation oder das Fahrzeug in unvorhergesehene Zustände bringen. So können einerseits Probleme aufgedeckt werden, die ansonsten nicht aufgedeckt worden wären, und andererseits die Signifikanz der die Funktionalität bestätigenden Aussagen weiter erhöht werden. Auch aufgrund dieses Aspektes wird das Aufzeigen der funktionalen Sicherheit und Zuverlässigkeit weiter unterstützt.

8.1.3 Abschluss des Entwicklungsprozesses

Der Entwicklungsprozess wird abgeschlossen, wenn ein ausgereiftes Konzept der kooperativen Automation sowie ausgereifte Konzepte und Methoden zur Umsetzung vorhanden sind (siehe Abbildung 8.2). Dies schließt ein, dass die Fragestellungen der Arbeit mit einer hinreichenden Signifikanz

beantwortet werden können sowie die Zielsetzungen erfüllt sind. Im Weiteren wird konkret auf die Bedeutung dieser Aspekte eingegangen.

Der Schlüssel zur Feststellung der Ausgereiftheit der kooperativen Automation im iterativen Entwicklungsprozess ist eine große Anzahl an durchgeführten Evaluierungen. In diesen Evaluierungen muss eine hohe Testabdeckung hinsichtlich der Szenarien und des Funktionsumfanges der kooperativen Automation erreicht werden. Des Weiteren müssen innerhalb der Evaluierungen verschiedene Versuchsplattformen (Fahrsimulatoren und Versuchsfahrzeuge) verwendet werden, um eine hohe Testabdeckung hinsichtlich versuchsplattformabhängiger Effekte zu erreichen.

Sind zugleich eine hinreichend große Anzahl an Evaluierungen erfolgt und eine hinreichend große Anzahl an Evaluierungen ohne Beanstandungen abgeschlossen worden, dann kann auf einen hohen Reifegrad geschlossen werden. Diese Feststellung gilt sowohl für das Konzept der kooperativen Automation, dessen technische Konkretisierung sowie für die Konzepte und Methoden zur Umsetzung, da sämtliche Bestandteile eng verzahnt entwickelt und evaluiert werden. Ein hoher Reifegrad der kooperativen Automation impliziert den Nachweis der technischen Umsetzbarkeit des Konzeptes sowie der Funktionalität der Umsetzung. Auf dieser Grundlage kann somit auch die aussagekräftige Beantwortung der zweiten zentralen Fragestellung der Arbeit „Welche Konzepte und Methoden eignen sich für die technische Umsetzung der kooperativen Automation für das teil- und hochautomatisierte Fahren?“ erfolgen.

Es bleibt die Frage, wie darauf aufbauend eine aussagekräftige Beantwortung der ersten zentralen Fragestellung „Wie kann ein Konzept für eine kooperative Automation für das teil- und hochautomatisierte Fahren technisch konkret aussehen, welches das Potential aufweist, die Probleme im Zusammenwirken von Mensch und Automation zu minimieren sowie einen Komfort- und Sicherheitsgewinn zu erreichen?“ unter Berücksichtigung der Automationsfunktionalität als Fokus dieser Arbeit erreicht werden kann. Wie bereits in der Einleitung zu Kapitel 8 dargelegt wurde (siehe auch Abbildung 8.1), bedeutet dieser Fokus, dass die Zielsetzung hinsichtlich der Interaktionsumsetzung die Beschreibung von Konzepten und Methoden zur Bereitstellung verschiedenster Kommunikationsmöglichkeiten umfasst, jedoch nicht die Beschreibung ihrer konkreten Ausgestaltung (siehe Abbildung 8.1). Da die konkrete Ausgestaltung der Interaktionsumsetzung aber einen erheblichen Einfluss auf die Wirkung der kooperativen Automation beim Fahrer hat, wird nicht auf allgemeingültige Aussagen hinsichtlich der genannten Aspekte abgezielt, sondern auf die Erreichung einer hohen Aussagekraft bezüglich des dahingehenden Wirkpotentials der Funktionalität der kooperativen Automation. Aufgrund der Fokussierung dieser Arbeit auf die Automationsfunktionalität sollen die aufgezeigten Wirkpotentiale demgegenüber technisch äußerst fundiert sein.

Der Ansatz zur Feststellung des Wirkpotentials der kooperativen Automation hinsichtlich der genannten Aspekte basiert im angewendeten iterativen Entwicklungsprozess auf einer großen Anzahl an durchgeführten Usability Untersuchungen mit Probanden. Aufgrund des Einflusses der Ausgestaltung der Interaktionsumsetzung auf das Ergebnis einer Untersuchung müssen diese Untersuchungen mit verschieden ausgestalteten Interaktionsumsetzungen durchgeführt werden (siehe Abbildung 8.1). Wurden zugleich eine hinreichend große Anzahl an Usability Untersuchungen durchgeführt und gleichartige Wirkpotentiale in einer hinreichend großen Anzahl an Untersuchungen mit unterschiedlich ausgestalteten Interaktionsumsetzungen festgestellt, kann auf eine hohe Aussagekraft hinsichtlich der erreichten Wirkpotentiale geschlossen werden. Aufgrund der Ausrichtung auf

die Automationsfunktionalität ist damit auch die robuste technische Untermauerung der aufgezeigten Wirkpotentiale dargelegt.

Basierend auf den Ergebnissen der vorliegenden Arbeit kann im Anschluss an diese Arbeit die Ausgestaltung einer Interaktionsumsetzung erfolgen, welche die aufgezeigten Wirkpotentiale bestmöglich ausschöpft. Für diese Gestaltung liefern die mit der kooperativen Automation evaluierten Ausgestaltungen und die damit erreichten Ergebnisse wertvolle Informationen. Für eine folgende Produktentwicklung bietet die vorliegende Arbeit sowohl die konzeptionelle als auch die technische Grundlage der Automationsfunktionalität. Im weiteren Produktentwicklungsprozess müssen Probandenstudien mit einer großen Anzahl an Probanden durchgeführt werden, um die Wirkungen der kooperativen Automation mit dieser konkreten Ausgestaltung der Interaktionsumsetzung abzusichern. Als Leitfaden für die weitere Vorgehensweise sollte der im Rahmen des Projektes RESPONSE 3 entwickelte europäische Code of Practice angewendet werden (siehe [112]). Hier werden unter anderem detaillierte Anforderungen an Studien zur Absicherung der Wirkungen genannt. Ein zentraler Aspekt des Code of Practice ist auch die Gewährleistung der Kontrollierbarkeit durch den Fahrer. Diese ist aufgrund des Zusammenwirkens von Automation und Fahrer bei der Fahrzeugführung, wie sie im Konzept der kooperativen Automation der Fall ist, von besonderer Bedeutung.

8.1.4 Übersicht und Gesamtbetrachtung der durchgeführten Evaluierungen

Im Verlauf der Arbeit wurde der Entwicklungsprozess häufig durchlaufen und dabei eine Vielzahl von Evaluierungen durchgeführt. Tabelle 8.1 gibt eine Übersicht sämtlicher erfolgter Evaluierungen.

Die Evaluierungen erfolgten im Rahmen von verschiedenen Projekten, deren Ziele eine gute Passung zu denen dieser Arbeit aufwiesen. Die Interaktionsumsetzung wurde jeweils projektspezifisch gestaltet. Die in den Projekten adressierten Szenarien variieren ebenfalls. Dadurch wird insgesamt für das in der Zielsetzung dieser Arbeit festgelegte Autobahnszenario eine hohe Testabdeckung erreicht. Durch zusätzliche an das Autobahnszenario angrenzende adressierte Szenarien, wie dem Stadtverkehr oder dem Fahren auf Parkplätzen, kann die Validität der Aussagen auch für das Autobahnszenario weiter gesteigert werden. Für diese Szenarien wurde einige Erweiterungen in der Umsetzung der kooperativen Automation hinzugefügt, die nicht Bestandteil dieser Arbeit sind. Sämtliche in dieser Arbeit vorgestellten Bestandteile der kooperativen Automation kamen wiederholt zum Einsatz und wurden somit vielfach evaluiert. Die in der Tabelle aufgeführten Projekte werden in Anhang B.2 detaillierter vorgestellt.

Für die Durchführung der Evaluierungen wurden verschiedene Versuchsplattformen verwendet. Diese umfassen eine Software in the Loop Simulation, Fahrsimulatoren (IDeELab, HMI-Lab, VR-Labor, dynamischer Fahrsimulator und MoSAIC-Labor) und Versuchsfahrzeuge (FASCar I, FASCar II und FASCarE). Die Versuchsplattformen werden ausführlich in Anhang B.1 vorgestellt.

In Tabelle 8.1 wird dargestellt, in welchen Projekten und unter Nutzung welcher Versuchsplattformen Evaluierungen durchgeführt worden sind. Einerseits sind dies die technischen Evaluierungen (gekennzeichnet durch ein „T“). Andererseits werden die durchgeführten Usability Untersuchun-

gen mit Probanden in der Tabelle aufgeführt (gekennzeichnet durch ein „P“ mit Angabe der Anzahl der Probanden). Eine Evaluierung grenzt sich von einer anderen ab durch eine signifikante Weiterentwicklung der kooperativen Automation oder einen anderen Versuchsaufbau. Der Versuchsaufbau wird ausgemacht durch die detaillierten umfassten Szenarien, die Versuchsplattform sowie den Projektrahmen, durch den zum Beispiel die Gestaltung der Interaktionsumsetzung gegeben ist. Die detaillierten umfassten Szenarien werden ausgemacht durch die baulichen Gegebenheiten der Versuchsstrecken sowie die auftretenden verkehrlichen Gegebenheiten. Im Rahmen der Arbeit wurde die kooperative Automation außerdem häufig öffentlich demonstriert. Diese öffentlichen Demonstrationen werden in der Tabelle ebenfalls aufgeführt (gekennzeichnet durch ein „Ö“). Dabei wurde die kooperative Automation Fachpublikum, der breiten Öffentlichkeit und Medienvertretern demonstriert.

Insgesamt wurden mit der kooperativen Automation 37 technische Evaluierungen und 17 Usability Untersuchungen mit Probanden durchgeführt. Dabei kamen 345 Probanden mit dem System in Kontakt. Diese Evaluierungen waren in der Summe so erfolgreich, dass 12 Projekte durch den Einsatz der kooperativen Automation mit sehr guten Ergebnissen abgeschlossen werden konnten (siehe dazu Anhang B.2). Diese Ergebnisse und damit die erfolgreichen Anwendungen der kooperativen Automation wurden in 21 öffentlichen Demonstrationen präsentiert. Die erfolgreiche Anwendung zeigt sich auch dadurch, dass die kooperative Automation immer wieder zum Einsatz in neuen Projekten ausgewählt wurde.

Die Vielzahl der erfolgreichen Evaluierungen und Anwendungen der kooperativen Automation zeigen, dass die avisierte Funktionalität der Umsetzung realisiert wurde. Damit wird auch die technische Umsetzbarkeit des Konzeptes der kooperativen Automation bestätigt. Weiterhin zeigt sich dadurch, dass die Konzepte und Methoden zur Umsetzung der kooperativen Automation ausgereift sind. Da das Konzept der kooperativen Automation die Grundlage aller Entwicklungen bildet, kann auch auf eine Ausgereiftheit dessen geschlossen werden. Damit kann auch der iterative Entwicklungsprozess abgeschlossen werden. Im Detail werden diese Aussagen zudem dadurch gestützt, dass die erfolgreichen Evaluierungen und Anwendungen unter Nutzung verschiedener Versuchsplattformen stattfanden sowie dass eine hohe Testabdeckung hinsichtlich der Szenarien und Funktionen der kooperativen Automation erreicht wurde. Die Summe der erfolgreichen Evaluierungen und Anwendungen deutet auch auf eine hohe erreichte funktionale Sicherheit und Zuverlässigkeit der Funktionalität hin. Außerdem kann dadurch auf eine hohe Eignung der Konzepte und Methoden für die technische Umsetzung der kooperativen Automation für das teil- und hochautomatisierte Fahren geschlossen werden. Aufgrund der Verwendung von verschiedenen ausgestalteten Interaktionsumsetzungen in den Evaluierungen zeigt sich die Unabhängigkeit von einer bestimmten Ausgestaltung und damit die Relevanz der Ergebnisse für die in dieser Arbeit im Fokus stehende Automationsfunktionalität.

Im Folgenden werden detaillierte Ergebnisse von vier beispielhaft ausgewählten Evaluierungen gezeigt. Diese umfassen eine technische Evaluierung sowie drei Usability Untersuchungen mit Probanden. In der Tabelle 8.1 sind diese Evaluierungen durch eine fette Schriftstärke markiert.

Zuerst werden die Ergebnisse einer technischen Evaluierung im Versuchsfahrzeug FASCar II im Projekt „Assistenz für Verkehrsteilnehmer“ in Kapitel 8.2 vorgestellt. Es folgen die Ergebnisse von drei Usability Untersuchungen mit Probanden: Kapitel 8.3.1 stellt die Ergebnisse einer im Fahrsi-

Projekt		Szenario	Umfassende Automatisierungsgrade	Versuchsplattformen								Technische Evaluierungen	Usability Untersuchungen	Probanden	Off. Demonstrationen	
				Software in the Loop	IDElab	HMI-Lab	VR-Labor	Dynam. Fahrsimulator	MoSAIC-Labor	Versuchsfzge. FASCar I	Versuchsfzge. FASCar II					Versuchsfzge. FASCarE
Legende: T: 1 durchgeführte technische Evaluierung n×T: n durchgeführte technische Evaluierungen P(n): 1 durchgef. Usability Unters. mit n Probanden Ö: 1 durchgeführte öffentliche Demonstration n×Ö: n durchgeführte öffentliche Demonstrationen Automatisierungsgrade: Driver Only , AS sistiert, Teil- Automatisiert, Hoch Automatisiert, Voll Automatisiert	Mobilität ohne Grenzen	Stadtverkehr	VA	T						T	T	2×Ö		3		2
	Assistenz für Verkehrsteilnehmer	Autobahn, autobahnähnliche Straßen	DO, TA	T	P(16)	T				T	P(6)	T		4	2	22
	FiF / VeEl - Valet Parking	Fahren auf Parkplatz inkl. Ein- und Ausparken	VA	T						4×T 4×Ö	T	2×T 2×Ö	8			6
	FiF / VeEl - MobiFAS	Autobahn	DO, HA	T			P(33) Ö						1	1	33	2
	FiF - urbanDRIVE	Stadtverkehr	DO, AS	T								2×T 2×Ö	3			2
	CityMobil	Autobahn	DO, HA	T	T					P(6)			2	1	6	
	H-Mode I & II	Autobahn inkl. Notsituationen, kreuzungsfreie Landstraßen, Weggabelungen	TA	T	P(6) P(6) Ö			P(24)					1	3	36	1
	HAVEit	Autobahn (in FASCar I und II nur Nutzung der Manöverplanung)	DO, AS, TA, HA	T	P(8)	T Ö		P(24)		T	T Ö		4	2	32	2
	IMoST I & II	Autobahn inkl. Einfädeln	DO, AS, TA	T	P(6)	T Ö	T Ö	P(12) Ö					3	2	18	3
	interactIVe	Autobahn inkl. Unfallvermeidung durch Notausweichen	DO, AS, TA	T	T	T Ö		P(40) P(16)			P(45)		3	3	101	1
D3CoS	Kooperatives Einfädeln auf einer Autobahn	DO, TA, HA	T	T	T 2×Ö			T				4			2	
AdaptIVe	Autobahn, Stadtverkehr	DO, TA, HA	T	P(41)			P(40)			P(16)		1	3	97		
Gesamt												37	17	345	21	

Tabelle 8.1: Übersicht der mit der kooperativen Automation durchgeführten technischen Evaluierungen, Usability Untersuchungen mit Probanden und öffentlichen Demonstrationen (Beschreibung der Versuchsplattformen und Projekte siehe Anhang B, für die durch eine fette Schriftstärke markierten Evaluierungen folgt eine detaillierte Beschreibung in diesem Kapitel)

mulator des IDeELab im Projekt H-Mode durchgeführten Untersuchung dar. In Kapitel 8.3.2 werden die Ergebnisse einer ebenfalls im Fahrsimulator des IDeELab durchgeführten Untersuchung vorgestellt, die Teil des Projektes HAVEit war. Abschließend erfolgt in Kapitel 8.3.3 die Darstellung von Ergebnissen einer Usability Untersuchung, die im Projekt „Assistenz für Verkehrsteilnehmer“ unter Nutzung des Versuchsfahrzeuges FASCar II realisiert wurde. Bei der Auswertung der Usability Untersuchungen wird insbesondere auf die Wirkpotentiale der kooperativen Automation hinsichtlich der Minimierung von Problemen im Zusammenwirken von Mensch und Automation und dem Gewinn von Komfort und Sicherheit eingegangen.

8.2 Ergebnisse einer ausgewählten technischen Evaluierung

Im Weiteren werden die Ergebnisse einer technischen Evaluierung vorgestellt, die unter Nutzung des Versuchsfahrzeuges FASCar II (siehe Anhang B.1) auf einem Testgelände durchgeführt wurde. Abbildung 8.3 zeigt das Versuchsfahrzeug während einer Versuchsfahrt auf diesem Testgelände. Der Fokus dieser technischen Evaluierung lag auf den im Rahmen der vorliegenden Arbeit umgesetzten Bearbeitungsebenen der kooperativen Automation (siehe Abbildung 5.1). Zur Interaktion mit der kooperativen Automation wurde aufgrund des genannten Zieles der Versuchsfahrten eine einfache, auf Tastenkommandos basierende Interaktionsumsetzung verwendet, die von einem eingewiesenen Testfahrer bedient wurde. Im Folgenden (Kapitel 8.2.1 und 8.2.2, Abbildungen 8.4 bis 8.6) werden die Ergebnisse von zwei Versuchsfahrten dargestellt, die insbesondere das Manöver „Fahrstreifen wechseln“ adressierten. Kapitel 8.2.3 resümiert abschließend die Ergebnisse beider Versuchsfahrten.



Abbildung 8.3: Versuchsfahrzeug FASCar II während einer Versuchsfahrt aus der ausgewählten technischen Evaluierung

Zu Beginn des Szenarios der Versuchsfahrten befindet sich das Versuchsfahrzeug auf dem Grundfahrstreifen einer zweistreifigen Fahrbahn ohne Gegenverkehr. Nach einiger Zeit wechselt das Versuchsfahrzeug auf den Überholfahrstreifen und folgt diesem. Im weiteren Verlauf des Szenarios wird ein weiterer Fahrstreifenwechsel zurück auf den Grundfahrstreifen durchgeführt. Abschließend folgt das Versuchsfahrzeug wieder dem Grundfahrstreifen. Der Unterschied der beiden Ver-

suchsfahrten besteht in der Belegung des Grundfahrstreifens. Bei der in Kapitel 8.2.1 analysierten Fahrt ist dieser frei von Objekten. Bei der in Kapitel 8.2.2 betrachteten Fahrt versperrt dort ein Objekt den Weg des Versuchsfahrzeuges. Die Entscheidungen zur Ausführung des Manövers „Fahrstreifen wechseln“ durch die kooperative Automation erfolgen jeweils mittels der gemeinsamen Manöverplanung von Automation und Fahrer.

Bevor die in den Abbildungen 8.4 und 8.6 gezeigten Ergebnisse in den Kapiteln 8.2.1 und 8.2.2 detailliert erläutert werden, erfolgt im Weiteren die Erklärung der einzelnen gezeigten Graphen. Der Fokus bei der Auswertung der Versuchsfahrten liegt auf der Bearbeitungsebene Manöverplanung (siehe Kapitel 6). Daher zeigen die Graphen die Entwicklung ausgewählter Aspekte der Manöverbäume $\mathbf{M}_{\text{Automation+}}$, $\mathbf{M}_{\text{Interaktion}}$ und $\mathbf{M}_{\text{Kooperation}}$ über die Zeit. Ein besonderer Fokus liegt dabei auf dem Manöver „Fahrstreifen wechseln“. Darüber hinaus wird der durch die Interaktionsumsetzung wahrgenommene Kontrollanteil in Querrichtung $\lambda_{\delta}^{\text{Interaktion}}$ dargestellt, der hier alleine durch die vom Testfahrer getätigten Aktionen am Lenkrad erfüllt wird. Die Kontrolle der Längsrichtung liegt während der Versuchsfahrten vollständig bei der Automation (zur Realisierung der Verteilung der Kontrollanteile siehe Kapitel 5.3). Zur Veranschaulichung der Versuchsfahrten wird außerdem die vom Versuchsfahrzeug gefahrene Bahn gezeigt.

Um die Entwicklung des Manöverbaumes $\mathbf{M}_{\text{Automation+}}$ aufzuzeigen, sind das aktuell vom Fahrzeug gefahrene Manöver m_{aktuell} (Wurzelmanöver des Manöverbaumes), die Valentiale der im Manöverbaum enthaltenen durchführbaren Manöver sowie das von der Automation beabsichtigt auszuführende Manöver (Markierung „ausgeführt“ im Manöverbaum $\mathbf{M}_{\text{Automation+}}$) abgebildet. Das von der Interaktionsumsetzung in der Verhandlung mit dem Fahrer bestimmte gemeinsam von Automation und Fahrer präferierte Manöver wird aus dem Manöverbaum $\mathbf{M}_{\text{Interaktion}}$ dargestellt. Die Markierung im Graphen wird jeweils zu dem Zeitpunkt gesetzt, bei dem ein neuer Manöverbaum $\mathbf{M}_{\text{Interaktion}}$ von der Interaktionsumsetzung zur Verfügung gestellt wird. Der Manöverbaum $\mathbf{M}_{\text{Kooperation}}$ wird durch die Valentiale der enthaltenen durchführbaren Manöver sowie das von der Automation ausgeführte Manöver dargestellt. Da das Wurzelmanöver in $\mathbf{M}_{\text{Kooperation}}$ identisch mit dem Wurzelmanöver in $\mathbf{M}_{\text{Automation+}}$ ist, wird auf die Darstellung dieses Manövers verzichtet. Zur detaillierteren Betrachtung der Funktionsweise der Manöverplanung hinsichtlich des Manövers „Fahrstreifen wechseln“ werden der Anlass a , die Intensität des Anlasses a_I und die Phase p des Manövers abgebildet. Diese Darstellung erfolgt sowohl für die Ausprägung „nach links“ als auch die Ausprägung „nach rechts“ des Manövers (zur Modellierung des Manövers „Fahrstreifen wechseln“ siehe Kapitel 7).

8.2.1 Fahrstreifenwechsel mit freiem Grundfahrstreifen

Im Folgenden wird auf die in Abbildung 8.4 gezeigten Ergebnisse der Versuchsfahrt mit freiem Grundfahrstreifen eingegangen. Abbildung 8.5 zeigt zur Verdeutlichung die Manöverbäume $\mathbf{M}_{\text{Automation+}}$ und $\mathbf{M}_{\text{Kooperation}}$ für den Zeitpunkt $t = 1,5$ s dieser Fahrt.

Zu Beginn der Versuchsfahrt folgt das Versuchsfahrzeug dem Grundfahrstreifen der Fahrbahn. Die Automation präferiert das Manöver „Fahrstreifen folgen“. Dies begründet sich durch die Verfolgung der Ziele der Automation. Eines der in dieser Situation relevanten Ziele ist das Halten der präferierten Geschwindigkeit (zu den von der Automation berücksichtigten Zielen siehe Kapitel 6.1.3).

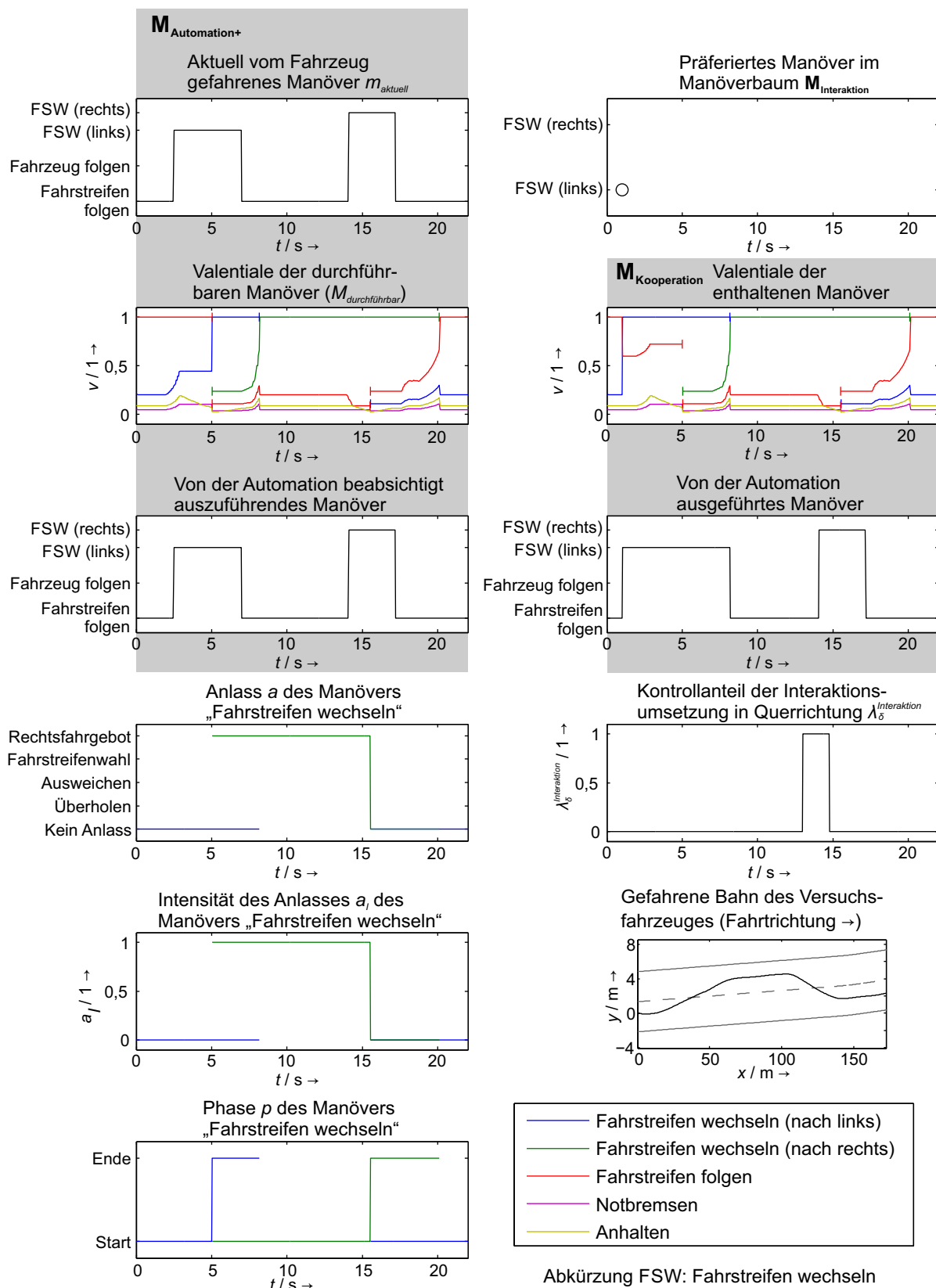
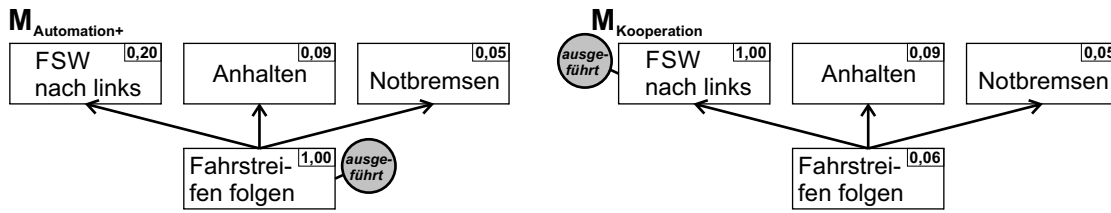


Abbildung 8.4: Ausgewählte Ergebnisse der Versuchsfahrt zur Durchführung von Fahrstreifenwechseln mit freiem Grundfahrstreifen

Da durch die weitere Fahrt auf dem Grundfahrstreifen keine Beeinträchtigung der Erreichung dieses Zieltes sowie der übrigen Ziele erwartet wird, liegt zur Ausführung des Manövers „Fahrstreifen



Abkürzung FSW: Fahrstreifen wechseln

Abbildung 8.5: Manöverbäume $M_{Automation+}$ und $M_{Kooperation}$ bei $t = 1,5$ s während der Versuchsfahrt zur Durchführung von Fahrstreifenwechseln mit freiem Grundfahrstreifen

wechseln“ kein Anlass vor. Da im Entscheidungsspielraum der Automation festgelegt ist, dass das Manöver „Fahrstreifen folgen“ direkt auf alleinige Initiative von der Automation ausgeführt werden darf, ist es auch das von der Automation beabsichtigt auszuführende Manöver.

Von der Interaktionsumsetzung liegt aktuell kein Manöverbaum vor, daher ist das Manöver „Fahrstreifen folgen“ das präferierte Manöver in $M_{Kooperation}$ sowie das aktuell von der Automation ausgeführte Manöver. Das aktuell vom Fahrzeug gefahrene Manöver $m_{aktuell}$ ist ebenfalls das Manöver „Fahrstreifen folgen“, da die Kontrolle des Fahrzeuges vollständig bei der Automation liegt.

Bei $t \approx 1$ s wird von der Interaktionsumsetzung ein neuer Manöverbaum mit dem präferierten Manöver „Fahrstreifen wechseln“ mit der Ausprägung „nach links“ bereitgestellt. Da es für die Automation durchführbar ist, wird diesem Manöver in $M_{Kooperation}$ als dem gemeinsam präferierten Manöver das höchste Valential zugewiesen. Daraufhin wird es als das aktuell von der Automation ausgeführte Manöver bestimmt, so dass die Automation mit der Ausführung dieses Manövers beginnt. Damit wurde von Automation und Fahrer eine gemeinsame Manöverplanung mittels expliziter Kommunikation (siehe Kapitel 6.4) durchgeführt. In $M_{Automation+}$ wird weiterhin die Präferenz der Automation dargestellt, das Manöver „Fahrstreifen folgen“ auszuführen. Als aktuell vom Fahrzeug gefahrenes Manöver wird noch bis zum Zeitpunkt $t \approx 2,5$ s das Manöver „Fahrstreifen folgen“ erkannt. Dies begründet sich dadurch, dass eine eindeutige Erkennung des Manövers „Fahrstreifen wechseln“ erst nach einigem Fortschritt in der Ausführung dieses Manövers möglich ist. Die beschriebene Konstellation der Manöverbäume $M_{Automation+}$ und $M_{Kooperation}$ im Anschluss an die gemeinsame Manöverplanung mittels expliziter Kommunikation wird verdeutlicht durch die grafische Darstellung dieser Manöverbäume für den Zeitpunkt $t = 1,5$ s in Abbildung 8.5.

Da bei $t \approx 5$ s die Position des Versuchsfahrzeuges vom Grundfahrstreifen auf den Überholfahrstreifen übergeht, erfolgt der Übergang in die Phase „Ende“ des Manövers „Fahrstreifen wechseln“ mit der Ausprägung „nach links“. Dieses Manöver wird in $M_{Automation+}$ zum präferierten Manöver der Automation, da das Ziel verfolgt wird, das Manöver abzuschließen. Als neues Manöver kommt das Manöver „Fahrstreifen wechseln“ mit der Ausprägung „nach rechts“ und dem Anlass „Rechtsfahrgebot“ hinzu. Nach dem Abschluss des Manövers „Fahrstreifen wechseln“ mit der Ausprägung „nach links“ präferiert die Automation das Manöver „Fahrstreifen wechseln“ mit der Ausprägung „nach rechts“ aufgrund der Beachtung des Rechtsfahrgebotes. Da im Entscheidungsspielraum festgelegt ist, dass die kooperative Automation das Manöver „Fahrstreifen wechseln“ nicht auf alleinige Initiative beginnen darf auszuführen, beabsichtigt sie die Ausführung des Manövers „Fahrstreifen folgen“. Dieses Manöver ist dann auch das von der Automation ausgeführte Manöver, wie in $M_{Kooperation}$ zu sehen ist.

Bei $t \approx 12,5$ s verändert der Testfahrer den durch die Interaktionsumsetzung wahrgenommenen Kontrollanteil in Querrichtung zu $\lambda_{\delta}^{Interaktion} = 1$. Da der durch die Interaktionsumsetzung wahrgenommene Kontrollanteil bei diesen Versuchsfahrten ausschließlich durch den Testfahrer erfüllt wird, liegt die Kontrolle der Querrichtung nun vollständig bei ihm. Er beginnt daraufhin nach rechts einzulenken, um so einen Fahrstreifenwechsel nach rechts zu initiieren. Dadurch begründet geht zum einen das Valential des bisher von der Automation ausgeführten Manövers „Fahrstreifen folgen“ aufgrund der Reduktion der Durchführbarkeit zurück, was schließlich zu einem Abbruch des Manövers führt. Zum anderen wird bei $t \approx 14$ s das Manöver „Fahrstreifen wechseln“ (Ausprägung: „nach rechts“) als aktuell vom Fahrzeug gefahrenes Manöver erkannt. Aufgrund der Anwendung der gemeinsamen Manöverplanung mittels impliziter Kommunikation (siehe Kapitel 6.3) wird dieses Manöver daraufhin zum von der Automation beabsichtigt auszuführenden Manöver in $\mathbf{M}_{Automation+}$. Im Anschluss wird dieses Manöver daher auch im Manöverbaum $\mathbf{M}_{Kooperation}$ als das von der Automation ausgeführte Manöver festgelegt. Die Automation beginnt nun ebenfalls die Ausführung dieses vom Fahrer initiierten Manövers. Bei $t \approx 14,5$ s übergibt der Testfahrer der Automation wieder die vollständige Kontrolle der Querrichtung. Somit steuert die Automation wiederum ausschließlich die für die Querführung des Fahrzeuges genutzte Aktorik und sorgt damit für die weitere Ausführung des Manövers „Fahrstreifen wechseln“.

Nach Abschluss dieses Manövers „Fahrstreifen wechseln“ erfolgt der Übergang in das Manöver „Fahrstreifen folgen“ und das Versuchsfahrzeug folgt abschließend dem Grundfahrstreifen.

8.2.2 Fahrstreifenwechsel mit durch ein Objekt versperrem Grundfahrstreifen

Der folgende Abschnitt geht auf die in Abbildung 8.6 gezeigten Ergebnisse der Versuchsfahrt mit durch ein stehendes Objekt versperrem Grundfahrstreifen ein.

Zu Beginn der Versuchsfahrt folgt das Versuchsfahrzeug dem Grundfahrstreifen der Fahrbahn. Es liegt hier die gleiche Situation wie zu Beginn der Versuchsfahrt mit freiem Grundfahrstreifen vor. Die Automation präferiert daher das Manöver „Fahrstreifen folgen“, beabsichtigt dieses Manöver auszuführen und führt es auch aus.

Da das sich vor dem Versuchsfahrzeug auf dem Grundfahrstreifen befindende Objekt im Verlauf der Fahrt näher kommt, ist bei $t \approx 2,3$ s das Manöver „Fahrstreifen folgen“ nicht weiter durchführbar. Dafür wird das Manöver „Annähern an Fahrzeug“ durchführbar, welches auch von der Automation präferiert wird. Da die Automation das Manöver „Annähern an Fahrzeug“ direkt auf alleinige Initiative beginnen darf auszuführen, beabsichtigt sie die Ausführung des Manövers. Wie im Manöverbaum $\mathbf{M}_{Kooperation}$ zu sehen ist, führt die Automation das Manöver auch aus.

Das Versuchsfahrzeug nähert sich daraufhin weiter dem Objekt an. Bei $t \approx 7,5$ s tritt daher bei dem Manöver „Fahrstreifen wechseln“ mit der Ausprägung „nach links“ der Anlass „Überholen“ auf. Die Intensität dieses Anlasses a_I steigt schnell auf den Wert 1 an. Daher präferiert die Automation nun das Manöver „Fahrstreifen wechseln“ mit der Ausprägung „nach links“. Das von der Automation beabsichtigt auszuführende Manöver in $\mathbf{M}_{Automation+}$ bleibt „Annähern an Fahrzeug“, da die Automation die Ausführung des Manövers „Fahrstreifen wechseln“ nicht auf alleinige Initiative

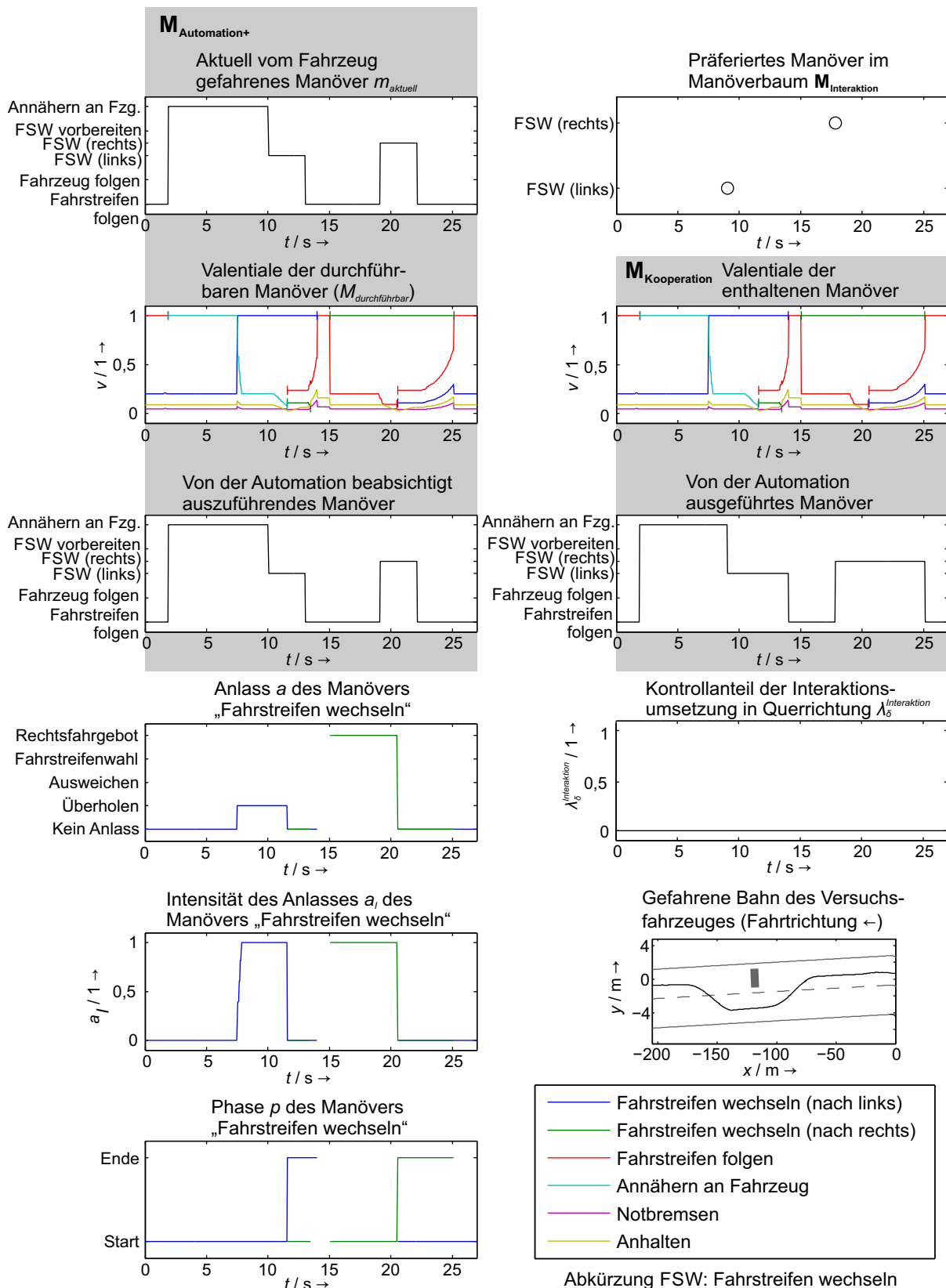


Abbildung 8.6: Ausgewählte Ergebnisse der Versuchsfahrt zur Durchführung von Fahrstreifenwechseln mit durch ein Objekt versperrtem Grundfahrstreifen

beginnen darf. Der Testfahrer wird aber darauf aufmerksam gemacht, dass die Automation dieses Manöver präferiert.

Daraufhin gibt dieser dem Wunsch der Automation nach, wodurch bei $t \approx 9$ s von der Interaktionsumsetzung ein neuer Manöverbaum mit dem präferierten Manöver „Fahrstreifen wechseln“ mit der Ausprägung „nach links“ bereitgestellt wird. Daher wird das Manöver als das von der Automation ausgeführte Manöver in $\mathbf{M}_{\text{Kooperation}}$ bestimmt, so dass die Automation mit der Ausführung dieses Manövers beginnt. Es wurde somit von Automation und Fahrer eine gemeinsame Manöverplanung mittels expliziter Kommunikation (siehe Kapitel 6.4) durchgeführt.

Nachdem das Manöver „Fahrstreifen wechseln“ mit der Ausprägung „nach links“ abgeschlossen wurde und sich somit das Versuchsfahrzeug auf dem Überholfahrstreifen befindet, präferiert die Automation das Manöver „Fahrstreifen folgen“, welches sie auch ausführt. Das Manöver „Fahrstreifen wechseln“ mit der Ausprägung „nach rechts“ wird erst dann durchführbar und auch präferiert, wenn das sich auf dem Grundfahrstreifen befindende Objekt passiert wurde (bei $t \approx 15$ s). Den Anlass für die Durchführung bildet dann das Rechtsfahrgebot.

In einer weiteren gemeinsamen Manöverplanung mittels expliziter Kommunikation wird die Entscheidung getroffen, das Manöver „Fahrstreifen wechseln“ mit der Ausprägung „nach rechts“ auszuführen (bei $t \approx 18$ s). Nach Abschluss dieses Manövers erfolgt der Übergang in das Manöver „Fahrstreifen folgen“ und das Fahrzeug folgt wieder dem Grundfahrstreifen.

8.2.3 Fazit

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass mit den Versuchsfahrten die erfolgreiche Realisierung der avisierten Funktionalität der kooperativen Automation im Versuchsfahrzeug FASCar II gezeigt werden konnte. Da bei der Auswertung der Fokus auf der Bearbeitungsebene Manöverplanung lag, gilt dies insbesondere für diese Bearbeitungsebene. Als Bestandteil der Bearbeitungsebene Manöverplanung konnte auch die korrekte Funktionalität der gemeinsamen Manöverplanung mittels impliziter und expliziter Kommunikation aufgezeigt werden. Da das Manöver „Fahrstreifen wechseln“ im Mittelpunkt des Szenarios der Versuchsfahrten stand, gilt die Feststellung der erfolgreichen Umsetzung der avisierten Funktionalität im Besonderen auch für dieses Manöver.

8.3 Ergebnisse aus Usability Untersuchungen mit Probanden

Im Folgenden werden detaillierte Ergebnisse von drei beispielhaft ausgewählten Usability Untersuchungen mit Probanden vorgestellt. Wie bereits ausführlich in Kapitel 8.1.2 erläutert wurde, wird aufgrund des Fokus dieser Arbeit auf die Automationsfunktionalität nicht auf die Wirkung der jeweiligen konkreten Gestaltung der Interaktionsumsetzung fokussiert. Daher wurden hier aus der Gesamtheit von durchgeführten Usability Untersuchungen (siehe Tabelle 8.1) gezielt solche ausgewählt, in denen verschiedene Interaktionsumsetzungen eingesetzt wurden. Die Analysen zielen aus der Perspektive der Automationsfunktionalität auf das Konzept der kooperativen Automation im Allgemeinen sowie auf die im Rahmen der Arbeit umgesetzten Bearbeitungsebenen und Kommunikationskanäle der kooperativen Automation im Speziellen ab. Bei der Einschätzung der dargestellten Ergebnisse ist jedoch der Einfluss der konkreten Gestaltung der Interaktionsumsetzung zu bedenken, da diese für die Probanden einen relevanten Beitrag zum Gesamteindruck leistet.

Die Szenarien der ausgewählten Usability Untersuchungen umfassen jeweils Fahrten auf Autobahnen oder autobahnähnlichen Straßen mit verschiedenen Verkehrssituationen. Kapitel 8.3.1 wertet Ergebnisse einer im Festsitzsimulator des IDeELab (**I**nteraction **D**esign and **E**rgonomics **L**aboratory, siehe Anhang B.1) durchgeführten Studie mit in verschiedenen Abständen und mit verschiedenen Relativgeschwindigkeiten plötzlich auftauchenden Vorderfahrzeugen aus. Anschließend werden in Kapitel 8.3.2 Ergebnisse einer ebenfalls im Festsitzsimulator des IDeELab durchgeführten Studie zum allgemeinen teil- und hochautomatisierten Fahren auf der Autobahn und zu Veränderungen des Kontrollanteiles der Automation untersucht. Den Abschluss bildet die in Kapitel 8.3.3 durchgeführte Analyse einer im Versuchsfahrzeug FASCar II (siehe Anhang B.1) erfolgten Studie mit dem Fokus auf der Durchführung von Fahrstreifenwechseln und der manuellen Übernahme der Kontrolle durch den Fahrer.

Die konkreten Fragestellungen, die bei den Auswertungen der Studien beantwortet werden sollen, werden durch die zentralen Fragestellungen der Arbeit bestimmt (siehe Kapitel 1.4). Daher erfolgen die Auswertungen hinsichtlich des durch die kooperative Automation bewirkten Sicherheitsgewinnes durch die Vermeidung möglicher Probleme im Zusammenwirken von Fahrer und Automation (zu den möglichen Problemen siehe Kapitel 1.2) sowie des durch weitere Wirkungen der Automation bewirkten Sicherheitsgewinnes. Neben der Betrachtung des Sicherheitsgewinnes werden die Studien aufgrund der zentralen Fragestellungen der Arbeit hinsichtlich des durch die kooperative Automation bewirkten Komfortgewinnes ausgewertet. Des Weiteren zielt die Auswertung der Studien daher auf die Evaluierung der Umsetzung der Kooperation ausmachenden Elemente ab, wobei die Elemente Kompatibilität, gemeinsame Handlungsplanung, gemeinsame Handlungsausführung und mentale Modelle besonders im Fokus stehen. Außerdem erfolgt die Evaluierung der Akzeptanz, des Nutzens und der Umsetzbarkeit der kooperativen Automation. Tabelle 8.2 gibt basierend auf dem in Kapitel 8.1.2 dargestellten Fragenkatalog eine Übersicht der konkreten Fragestellungen der Studien. Die Tabelle zeigt außerdem auf, welche dieser konkreten Fragestellungen bei der Auswertung der einzelnen Studien besonders adressiert werden.

Bei der Darstellung der einzelnen Usability Untersuchungen wird folgendermaßen vorgegangen: Nach einer kurzen Einführung werden die Gestaltung der Interaktionsumsetzung und die Konfiguration der kooperativen Automation erläutert. Es schließen sich die Beschreibungen der Szenari-

	Beispielstudie 1	Beispielstudie 2	Beispielstudie 3
Sicherheitsgewinn durch Vermeidung möglicher Probleme im Zusammenwirken von Fahrer und Automation			
Wird der Aufbau eines übersteigerten Vertrauens der Probanden zur kooperativen Automation vermieden?	x	x	
Wird die „Out-of-the-loop“ Problematik von der kooperativen Automation vermieden?	x	x	
Wird nicht erwartungsgemäßes Verhalten von der kooperativen Automation vermieden?	x	x	x
Wird der Verlust manueller Fähigkeiten der Probanden von der kooperativen Automation vermieden?		x	x
Wird eine geringe Belastung der Probanden, welche Unaufmerksamkeit zur Folge hat, von der kooperativen Automation vermieden?	x		
Werden ein mentaler Abstand der Probanden zur Fahraufgabe und ein daraus resultierendes vermindertes Situationsbewusstsein von der kooperativen Automation vermieden?	x	x	
Sicherheitsgewinn durch weitere Wirkungen der Automation			
In welchem Maße entlastet die kooperative Automation die Probanden bei der Erfüllung der Fahraufgabe und sorgt somit für einen Sicherheitsgewinn?		x	
Inwiefern beeinflusst die kooperative Automation die Kontrollierbarkeit des Fahrzeuges für die Probanden?	x		x
Inwiefern empfinden die Probanden einen allgemeinen Sicherheitsgewinn, der durch die kooperative Automation bewirkt wird?	x	x	
Komfortgewinn durch die Automation			
In welchem Maße entlastet die kooperative Automation die Probanden bei der Erfüllung der Fahraufgabe und sorgt somit für einen Komfortgewinn?		x	
Inwiefern entwickeln die Probanden ein Wohlgefühl hinsichtlich der Handlungen der kooperativen Automation?	x	x	x
Kooperation ausmachende Elemente			
Wird Kompatibilität erreicht?	x	x	x
Inwiefern ist die gemeinsame Handlungsplanung für die Probanden gegeben und wie wird sie von ihnen empfunden?	x	x	x
Inwiefern ist die gemeinsame Handlungsausführung für die Probanden gegeben und wie wird sie von ihnen empfunden?	x	x	x
Inwiefern ermöglicht und fördert die kooperative Automation den Aufbau eines mentalen Modells bei den Probanden?	x	x	
Allgemeine Fragestellungen			
Wird die kooperative Automation von den Probanden akzeptiert?	x	x	x
Wie wird der Nutzen der kooperativen Automation von den Probanden bewertet?	x	x	
Ist die Umsetzbarkeit der kooperativen Automation gegeben?	x	x	x

Tabelle 8.2: Konkrete Fragestellungen für die Auswertung der Usability Untersuchungen und Übersicht der bei der Auswertung der jeweiligen Untersuchung besonders adressierten Fragestellungen

en und des Ablaufes der Studie an. Abschließend werden die Ergebnisse der Studie erläutert. Zur besseren Übersicht wird der jeweilige Versuchsaufbau mittels einer tabellarischen Kurzübersicht zusammengefasst.

8.3.1 Beispielstudie 1: Plötzlich auftauchendes Vorderfahrzeug (Festsitzsimulator des IDeELab)

Die Szenarien dieser im Festsitzsimulator des IDeELab (siehe Anhang B.1) durchgeführten Usability Untersuchung fanden auf einer dreistreifigen Autobahn statt. Zu Beginn der Szenarien fuhren die Probanden mit einer vorgegebenen Geschwindigkeit auf dem mittleren Fahrstreifen dieser Autobahn. Nach einiger Zeit tauchten plötzlich in verschiedenen Abständen und mit verschiedenen Relativgeschwindigkeiten Vorderfahrzeuge auf, so dass sich verschieden kritische Situationen ergaben. Dabei waren der vom Probanden aus gesehen linke und rechte Fahrstreifen entweder durch Objekte belegt oder frei von Objekten. Somit resultierten Situationen, in denen es möglich war, den Fahrstreifen zu wechseln, um das auftauchende Vorderfahrzeug zu überholen oder ihm auszuweichen, sowie Situationen, in denen es lediglich möglich war, durch eine Bremsung zu reagieren. Abbildung 8.7 zeigt jeweils eine Situation aus den Szenarien mit Fahrstreifenwechsellmöglichkeit und aus den Szenarien ohne Fahrstreifenwechsellmöglichkeit sowie einen Probanden während der Studie im Festsitzsimulator des IDeELab. Tabelle 8.3 zeigt eine Kurzübersicht der Studie.

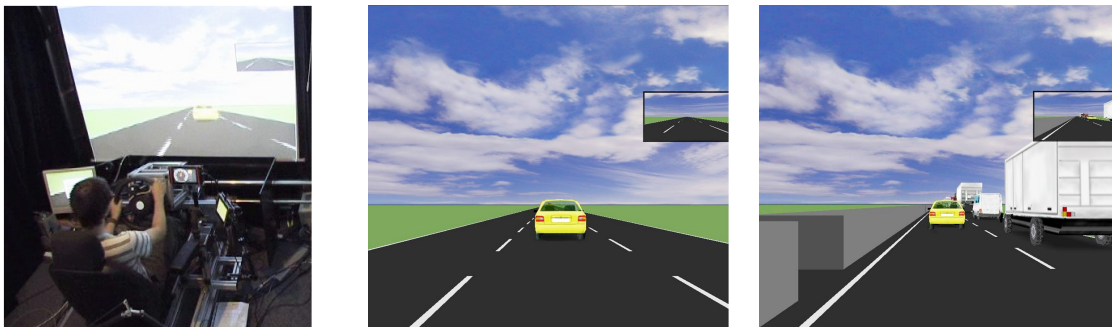


Abbildung 8.7: Beispielstudie 1: Proband im Festsitzsimulator des IDeELab während der Studie, Situation mit Fahrstreifenwechsellmöglichkeit und Situation ohne Fahrstreifenwechsellmöglichkeit

Gestaltung der Interaktionsumsetzung und Konfiguration der kooperativen Automation

Die Studie wurde im Rahmen des Projektes H-Mode (siehe Anhang B.2) durchgeführt, dessen Ziel darin besteht, die Kommunikation zwischen dem Fahrer und einem teil- oder hochautomatisierten Fahrzeug mit dem Hauptaugenmerk auf der Nutzung der Haptik mittels des Einsatzes aktiver Stellteile zu gestalten (zum Projekt H-Mode siehe auch Kapitel 2.1). Für diese Studie wurde daher die Kommunikation mit der kooperativen Automation mithilfe eines aktiven Lenkrades und aktiver Pedale gestaltet und in der Bearbeitungsstufe Interaktionsumsetzung umgesetzt. Für weitere Informationen zur Kommunikationsgestaltung für diese Studie siehe [86].

Die gemeinsame Handlungsausführung wurde mittels eines aktiven Lenkrades und aktiver Pedale umgesetzt. Basierend auf den im Stellaktionsvalentialfeld enthaltenen Stellaktionspunkten wurden

Projekt	H-Mode
Szenario	Fahren auf der Autobahn mit plötzlich auftauchendem Vorderfahrzeug, dabei Situationen mit Fahrstreifenwechsellmöglichkeit und ohne Fahrstreifenwechsellmöglichkeit
Umfasste Automatisierungsgrade / Kontrollverteilungen	Teilautomatisiert mit niedrigem Kontrollanteil der Automation und mit hohem Kontrollanteil der Automation
Gestaltung der Interaktionsumsetzung	Fokus: Haptik mit aktivem Lenkrad und aktiven Pedalen
Versuchsplattform	Festsitzsimulator des IDEELab
Anzahl Probanden	6 (3 weiblich, 3 männlich)
Alter der Probanden	23 bis 50 Jahre, Ø 35,5 Jahre
Fahrerfahrung der Probanden	5 bis 26 Jahre, Ø 16,8 Jahre

Tabelle 8.3: Kurzübersicht zu Beispielstudie 1: Plötzlich auftauchendes Vorderfahrzeug

von der Interaktionsumsetzung Drehmomente am Lenkrad sowie Kräfte an den Pedalen generiert. Die aus diesem Einwirken der kooperativen Automation sowie dem Einwirken des Fahrers resultierenden Stellungen des Lenkrades und der Pedale wurden von der Interaktionsumsetzung der Bearbeitungsebene Steuerung / Regelung übermittelt ($\eta_{norm}^{Interaktion}$, $\delta_{norm}^{Interaktion}$). Da die kooperative Automation über keinen direkten Kontrollanteil verfügte und somit die Kontrolle vollständig von der Interaktionsumsetzung wahrgenommen wurde ($\lambda_{\eta}^{Interaktion} = 1$, $\lambda_{\delta}^{Interaktion} = 1$), fanden ausschließlich die resultierenden Stellungen des Lenkrades und der Pedale zur Einstellung der Stellgrößen des Fahrzeuges Verwendung. Aufgrund der beschriebenen Einwirkungen auf Lenkrad und Pedale erfolgte die eigentliche Erfüllung der Kontrolle trotzdem zum einen Teil von der kooperativen Automation und zum anderen Teil vom Fahrer. Durch die Einstellung der Drehmomente am Lenkrad sowie der Kräfte an den Pedalen wurden zwei Kontrollanteile der Automation realisiert. Der niedrige Kontrollanteil der Automation zeichnete sich durch vergleichsweise kleine Drehmomente und Kräfte aus. Der hohe Kontrollanteil der Automation wurde durch das Aufbringen höherer Drehmomente und Kräfte realisiert. Darüber hinaus hatte die Automation bei dem hohen Kontrollanteil die Möglichkeit, bei Annäherung an das Vorderfahrzeug die direkte Kontrolle in Längsrichtung vollständig wahrzunehmen ($\lambda_{\eta}^{Automation} = 1$) und so mittels direkten Zugriffes auf die Fahrzeugstellgrößen eine Bremsung des Eigenfahrzeuges herbeizuführen. In den Notsituationen konnte die kooperative Automation die direkte Kontrolle vollständig wahrnehmen und somit direkt auf sämtliche Stellgrößen einwirken ($\lambda_{\delta}^{Automation} = 1$, $\lambda_{\eta}^{Automation} = 1$).

Um den Entscheidungsspielraum der kooperativen Automation zu konfigurieren, wurde festgelegt, dass das Manöver „Fahrstreifen wechseln“ während normaler Situationen nicht auf alleinige Initiative von der Automation durchführbar ist. Lediglich in den Notsituationen konnte die kooperative Automation das Manöver auf alleinige Initiative zur Ausführung bringen, um eine Kollision zu vermeiden. Die übrigen Manöver waren in sämtlichen Situationen auf alleinige Initiative von der Automation durchführbar.

Die Kommunikation für die gemeinsame Handlungsplanung mittels expliziter Kommunikation wurde mit Hilfe des aktiven Lenkrades realisiert. Um dem Fahrer die Präferenz der Automation zur Ausführung des Manövers „Fahrstreifen wechseln“ mitzuteilen, wurde ein zweifacher, lateral gerichteter Impuls am Lenkrad dargeboten. Zur Freigabe der Ausführung des Manövers „Fahrstreifen wechseln“ durch die Automation musste der Fahrer den Blinker der entsprechenden Richtung betätigen sowie einen leichten Impuls auf das Lenkrad in die gleiche Richtung geben. Mittels dieser Botschaft war es für den Fahrer darüber hinaus möglich, in Situationen, in denen die Automation die Ausführung des Manövers „Fahrstreifen wechseln“ nicht präferiert, es aber durchführbar ist, die Automation zur Ausführung dieses Manövers zu bewegen. Neben der beschriebenen Nutzung von expliziter Kommunikation zur gemeinsamen Handlungsplanung konnte auch die implizite Kommunikation verwendet werden.

Szenarien und Ablauf der Studie

Für die Studie wurden sechs Szenarien aufgebaut, die sich einerseits durch den Abstand und die Relativgeschwindigkeit zum plötzlich auftauchenden Vorderfahrzeug unterschieden, andererseits durch die Belegung der benachbarten Fahrstreifen (siehe Tabelle 8.4). Nach dem Auftauchen bewegte sich das Vorderfahrzeug mit einer konstanten Geschwindigkeit. In den ersten drei Szenarien waren der aus Sicht des Probanden linke und rechte Fahrstreifen frei von Objekten. Der Abstand und die Relativgeschwindigkeit zum plötzlich auftauchenden Vorderfahrzeug wurden so gewählt, dass sich eine wenig kritische Situation, eine mittel kritische Situation sowie eine hoch kritische Situation ergaben. Für die zweiten drei Szenarien wurden auf den aus Sicht des Probanden linken und rechten Fahrstreifen Objekte so platziert, dass sich keine Möglichkeit ergab, einen Fahrstreifenwechsel auf einen dieser Fahrstreifen durchzuführen. Das Vorderfahrzeug tauchte in den gleichen Abständen und mit den gleichen Relativgeschwindigkeiten wie bei den ersten drei Szenarien auf, so dass sich auch hier eine wenig kritische Situation, eine mittel kritische Situation sowie eine hoch kritische Situation ergaben. Während sämtlicher Studienszenarien sollten die Probanden zur Ablenkung eine visuelle Zweitaufgabe bearbeiten.

Abstand und Relativgeschwindigkeit zum auftauchenden Vorderfahrzeug	Belegungsgrad linker und rechter Fahrstreifen	
	frei	belegt
Großer Abstand und Eigenfahrzeug gering schneller als Vorderfahrzeug → wenig kritische Situation	Studienszenario 1	Studienszenario 4
Mittlerer Abstand und Eigenfahrzeug mäßig schneller als Vorderfahrzeug → mittel kritische Situation	Studienszenario 2	Studienszenario 5
Geringer Abstand und Eigenfahrzeug deutlich schneller als Vorderfahrzeug → hoch kritische Situation	Studienszenario 3	Studienszenario 6

Tabelle 8.4: Beispielstudie 1: Übersicht der Studienszenarien

Der Ablauf der Studie gliederte sich folgenderweise (siehe auch Abbildung 8.8): Zuerst erfolgte eine manuelle Trainingsfahrt zur Gewöhnung an den Fahrsimulator, bei der sich außer dem Eigenfahrzeug des Probanden keine weiteren Fahrzeuge auf der Autobahn befanden. Im weiteren Verlauf der Studie wurden die sechs beschriebenen Studienszenarien unter verschiedenen Bedingungen durchfahren. Nach einer manuellen Durchfahrt der Studienszenarien erfolgte die erste Fahrt unter Verwendung der kooperativen Automation. Die Probanden durchfuhren die Studienszenarien dabei einmal unter Verwendung des niedrigen Kontrollanteiles der Automation sowie einmal unter Verwendung des hohen Kontrollanteiles der Automation. Es folgte eine Trainingsphase, in der die Probanden den Umgang mit der kooperativen Automation erlernen konnten. Ihnen wurde dazu auch das Verhalten des Systems erläutert. Nach dieser Trainingsphase erfolgte abschließend die zweite Fahrt mit der kooperativen Automation, wobei wiederum die Szenarien sowohl mit dem niedrigen Kontrollanteil als auch mit dem hohen Kontrollanteil der Automation durchfahren wurden.

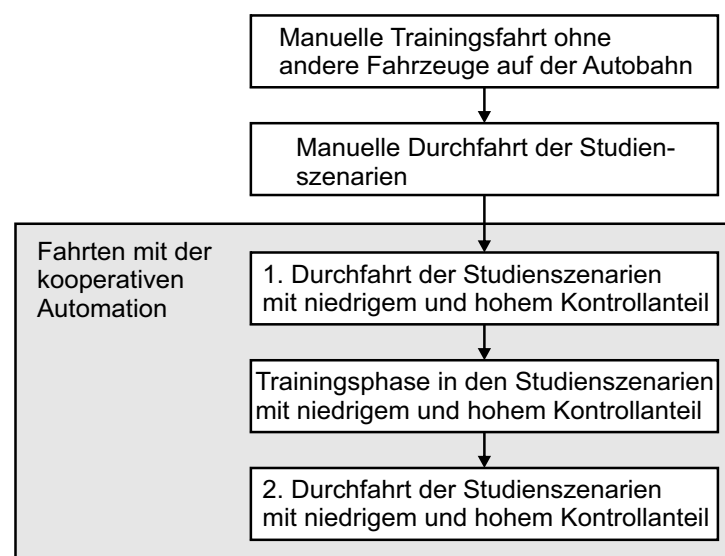


Abbildung 8.8: Beispielstudie 1: Übersicht des Studienablaufes

Bei den Teilnehmern der Studie handelte es sich um 6 Probanden im Alter von 23 bis 50 Jahren (durchschnittlich 35,5 Jahre) mit einer Fahrerfahrung von 5 bis 26 Jahren (durchschnittlich 16,8 Jahre). 3 der Probanden waren weiblich sowie 3 männlich.

Die im Rahmen der Auswertung dieser Studie besonders adressierten Fragestellungen zur Evaluierung der kooperativen Automation zeigt Tabelle 8.2. Aufgrund dieser Fragestellungen wurden die in den Abbildungen 8.9 und 8.10 aufgeführten Fragen zur Beantwortung durch die Probanden ausgewählt. Diese Fragen wurden den Probanden jeweils nach der ersten und zweiten Fahrt mit der kooperativen Automation separat für den niedrigen und hohen Kontrollanteil zur Beantwortung vorgelegt. Des Weiteren erfolgte die Auswertung von Reaktionszeiten der Probanden bei dem plötzlich auftauchenden Vorderfahrzeug in der hoch kritischen Situation (siehe Abbildung 8.11). Da die Probanden während der Fahrten mit der kooperativen Automation ständig das Gaspedal betätigen mussten, konnte die Reaktionszeit vom Erscheinen des Hindernisses bis zur ersten Veränderung der Pedalstellungen gemessen werden. Es wurden hier die Reaktionszeiten der manuellen Fahrt durch die Studienszenarien sowie der ersten Fahrt unter Verwendung der kooperativen Automation verwendet.

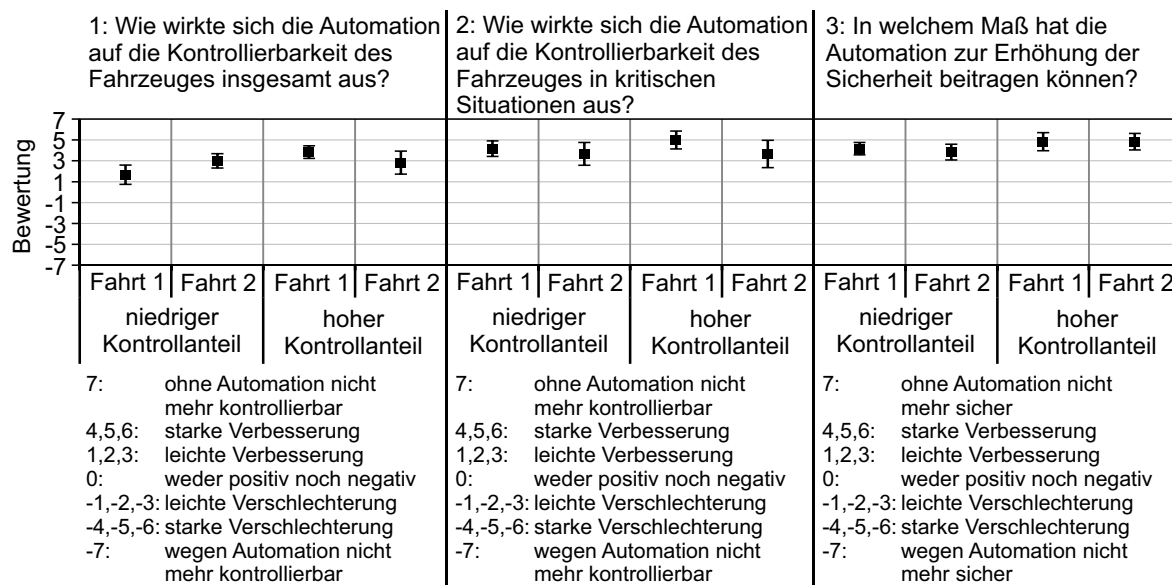


Abbildung 8.9: Beispielstudie 1: Mittelwerte der Antworten der Probanden hinsichtlich der Fragen 1 bis 3. Die Fehlerbalken stellen die Standardfehler des Mittelwertes dar.

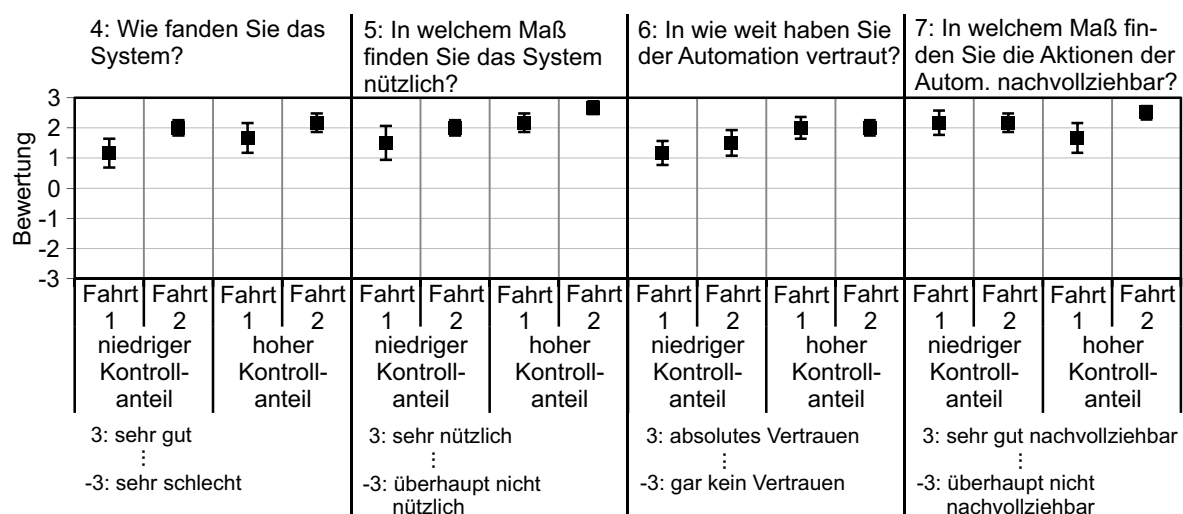


Abbildung 8.10: Beispielstudie 1: Mittelwerte der Antworten der Probanden hinsichtlich der Fragen 4 bis 7. Die Fehlerbalken stellen die Standardfehler des Mittelwertes dar.

Ergebnisse

Die Probanden empfanden durch den Einfluss der kooperativen Automation eine deutliche Verbesserung der Kontrollierbarkeit des Fahrzeuges über sämtliche Situationen hinweg (Frage 1, Abbildung 8.9). Auch bei gezielter Betrachtung der kritischen Situationen bewerteten die Probanden die Kontrollierbarkeit als deutlich verbessert (Frage 2, Abbildung 8.9). Aufgrund dieser Verbesserung der Kontrollierbarkeit ergibt sich ein durch die kooperative Automation bewirkter Sicherheitsgewinn. Für den durch die kooperative Automation bewirkten Sicherheitsgewinn spricht auch die direkte Bewertung des Sicherheitsgewinnes durch die Probanden (Frage 3, Abbildung 8.9), aus der eine stark empfundene Verbesserung der Sicherheit resultiert.

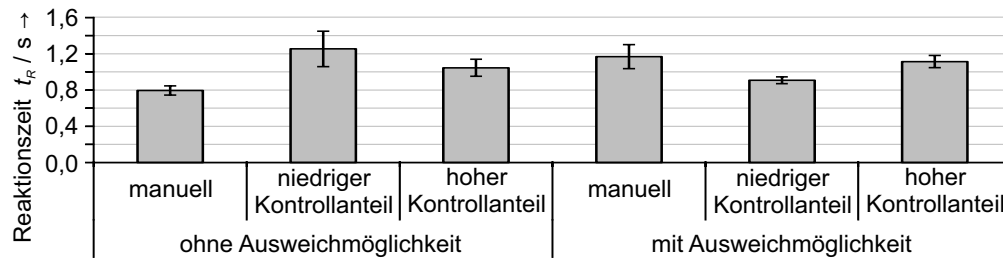


Abbildung 8.11: Beispielstudie 1: Mittelwerte der Reaktionszeiten der Probanden bei plötzlich auftauchendem Vorderfahrzeug in der hoch kritischen Situation. Die Fehlerbalken stellen die Standardfehler des Mittelwertes dar.

Sowohl die Akzeptanz der kooperativen Automation als auch die Beurteilung des Nutzens waren hoch (Fragen 4 und 5, Abbildung 8.10). Da insbesondere auch die gemeinsame Handlungsplanung und Handlungsausführung im Fokus der Studie standen, kann dieses Ergebnis als Indikator für ein positives Erleben der Probanden hinsichtlich dieser Kooperation ausmachenden Elemente gewertet werden.

Des Weiteren zeigten sich eine hohes Systemvertrauen und eine gute bis sehr gute Bewertung der Nachvollziehbarkeit der Aktionen der kooperativen Automation (Fragen 6 und 7, Abbildung 8.10). Daher kann die Kompatibilität der kooperativen Automation als erreicht betrachtet werden. Im speziellen gilt dies auch für das Manöver „Fahrstreifen wechseln“, auf dem ein Hauptaugenmerk der Studie lag. Außerdem ergeben sich Hinweise auf den erfolgreichen Aufbau eines mentalen Modells der kooperativen Automation sowie der Entwicklung eines Wohlgefühls hinsichtlich der Handlungen der kooperativen Automation, welches zu einem Komfortgewinn führt. Des Weiteren kann auf eine erfolgreiche Vermeidung von nicht erwartungsgemäßem Verhalten der kooperativen Automation geschlossen werden, woraus ein Sicherheitsgewinn resultiert.

Die in Abbildung 8.11 dargestellten Reaktionszeiten der Probanden in der hoch kritischen Situation zeigen, dass es keine deutliche Verschlechterung von der manuellen Fahrt hin zu den Fahrten mit der kooperativen Automation gab. Damit liegt ein erster Hinweis vor, dass verschiedene der möglichen Probleme im Zusammenwirken von Fahrer und Automation durch die kooperative Automation vermieden werden können und somit ein Sicherheitsgewinn erreicht werden kann. Dieses sind im Einzelnen die Vermeidung von übersteigertem Vertrauen zur Automation, die Vermeidung der „Out-of-the-loop“ Problematik, die Vermeidung zu geringer Belastung der Probanden mit daraus folgender Unaufmerksamkeit und die Vermeidung von mentalem Abstand zur Fahraufgabe mit daraus folgendem verminderten Situationsbewusstsein.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die in dieser Studie adressierten Fragestellungen bezüglich der kooperativen Automation (siehe Tabelle 8.2) im Rahmen der Studienszenarien sehr positiv beantwortet werden konnten. Im Einzelnen konnte auf einen unter anderem durch die Vermeidung möglicher Probleme im Zusammenwirken von Fahrer und Automation bewirkten Sicherheitsgewinn durch die kooperative Automation sowie einen bewirkten Komfortgewinn geschlossen werden. Des Weiteren ergab sich ein positives Ergebnis bezüglich der evaluierten Kooperation ausmachenden Elemente sowie der Akzeptanz und des Nutzens der kooperativen Automation. Durch den insgesamt erfolgreichen Verlauf der Studie ergibt sich ein deutlicher Hinweis darauf, dass die Umsetzbarkeit des Konzeptes der kooperativen Automation im Rahmen der Studienszenarien ge-

geben ist. Für eine höhere Signifikanz dieser Aussage müssen die Ergebnisse weiterer ähnlich angelegter Studien hinzugezogen werden. Hinsichtlich des aufgrund der Szenarien besonders im Fokus stehenden Manövers „Fahrstreifen wechseln“ ist anzumerken, dass die gesamte Bandbreite von unkritischen Fahrstreifenwechseln bis hin zu Ausweichmanövern erfolgreich abgedeckt wurde.

Da diese Studie im Rahmen des in der Arbeit angewendeten Entwicklungsprozesses als Usability Untersuchung mit einer geringen Anzahl an Probanden angelegt wurde, können die aufgeführten Erkenntnisse nicht als mit hoher Signifikanz erwiesen betrachtet werden. Die Signifikanz der Ergebnisse reicht aber aus, um in der auf die Studie folgenden Entwicklungsphase zielgerichtet und effizient die kooperative Automation weiter voranbringen zu können. Sie liefern des Weiteren, gemeinsam mit den von anderen Studien erbrachten Aussagen, einen wichtigen Baustein zur Erlangung einer hohen Aussagekraft hinsichtlich der Fragestellungen dieser Arbeit.

8.3.2 Beispielstudie 2: Allgemeines Fahren auf der Autobahn mit manueller Übernahme der Kontrolle (Festsitzsimulator des IDeELab)

Diese im Rahmen des Projektes HAVEit (**H**ighly Automated **V**ehicles for **I**ntelligent **T**ransport, siehe Anhang B.2) durchgeführte Studie fand ebenfalls im Festsitzsimulator des IDeELab statt (siehe Anhang B.1). Im Szenario der Studie sollten die Probanden auf einer dreistreifigen Autobahn mit umgebendem Verkehr fahren. Es wurden dabei keine besonderen Situationen in das Szenario eingefügt. Neben dem freien Fahren mit der kooperativen Automation lag der Fokus der Studie auf Veränderungen des Kontrollanteiles und dem Manöver „Fahrstreifen wechseln“. Abbildung 8.12 zeigt einen Probanden während der Studie im Fahrsimulator. In Tabelle 8.5 wird eine kurze Übersicht der Studie gegeben.



Abbildung 8.12: Beispielstudie 2: Proband im Festsitzsimulator des IDeELab während der Studie

Gestaltung der Interaktionsumsetzung und Konfiguration der kooperativen Automation

Für diese Studie wurden drei verschiedene Kontrollverteilungen umgesetzt, aus denen der Fahrer während der Fahrt auswählen konnte. Die Kontrollverteilungen wurden als Stufen „Assistiert“, „ACC“ und „Hochautomatisiert“ benannt. Die Anzeige der aktuellen Stufe sowie der auswählbaren

Projekt	HAVEit
Szenario	Fahren auf der Autobahn mit umgebendem Verkehr, daneben im Fokus: Veränderungen des Kontrollanteiles, Manöver „Fahrstreifen wechseln“
Umfasste Automatisierungsgrade / Kontrollverteilungen	Driver Only: im Rahmen der Studie als „Assistiert“ bezeichnet Assistiert: Automatisierung der Längsführung, im Rahmen der Studie als „ACC“ bezeichnet Hochautomatisiert: ebenfalls als „Hochautomatisiert“ bezeichnet
Gestaltung der Interaktionsumsetzung	Haptisch mittels eines aktiven Lenkrades, aktiven Pedalen und eines Lenkstockhebels, visuell mittels eines Head-down-Displays
Versuchsplattform	Festsitzsimulator des IDeELab
Anzahl Probanden	8 (4 weiblich, 4 männlich)
Alter der Probanden	25 bis 62 Jahre, Ø 39,25 Jahre
Fahrerfahrung der Probanden	6 bis 46 Jahre, Ø 20,75 Jahre

Tabelle 8.5: Kurzübersicht zu Beispielstudie 2: Allgemeines Fahren auf der Autobahn

Stufen erfolgte in einem Display. Zur Umschaltung zwischen den Stufen musste der Fahrer entweder einen Hebel oder Tasten betätigen. Für weitere Informationen zur Gestaltung der Interaktion siehe [177]. Die Realisierung erfolgte in der Bearbeitungsstufe Interaktionsumsetzung.

In der Stufe „Assistiert“ lag die Kontrolle vollständig beim Fahrer. Es wurden dem Fahrer lediglich verschiedene Warnungen durch die Interaktionsumsetzung dargeboten.

Die Stufe „ACC“ zeichnete sich durch die vollständige direkte Kontrolle der Längsrichtung durch die kooperative Automation aus ($\lambda_{\eta}^{Automation} = 1$). Die Kontrolle der Querrichtung wurde vollständig von der Interaktionsumsetzung wahrgenommen ($\lambda_{\delta}^{Interaktion} = 1$). Da dieser Kontrollanteil ausschließlich durch den Fahrer erfüllt wurde, lag die Kontrolle der Querrichtung vollständig bei ihm.

In der Stufe „Hochautomatisiert“ wurde die Kontrolle sowohl in Längs- als auch in Querrichtung vollständig von der kooperativen Automation ausgeübt. In Längsrichtung wurde dies wiederum durch die vollständige direkte Kontrolle der kooperativen Automation realisiert ($\lambda_{\eta}^{Automation} = 1$). Die vollständige Kontrolle der Querrichtung wurde analog zu Beispielstudie 1 (siehe Kapitel 8.3.1) unter Verwendung der Interaktionsumsetzung umgesetzt ($\lambda_{\delta}^{Interaktion} = 1$). Basierend auf den im Stellaktionsvalentialfeld enthaltenen Stellaktionspunkten wurden Drehmomente am Lenkrad generiert. Für die Fahrzeugsteuerung in Querrichtung wurde dann ausschließlich die resultierende Lenkradstellung verwendet. Die Drehmomente wurden derart eingestellt, dass eine sichere Steuerung der Fahrzeugquerrichtung alleine durch die kooperative Automation möglich war. Es war in dieser Stufe für den Fahrer nicht notwendig, die Hände am Lenkrad zu halten und somit zur Kontrolle beizutragen. Im Rahmen der gemeinsamen Handlungsausführung war es ihm aber jederzeit möglich, einen Beitrag zu leisten.

Die gemeinsame Handlungsplanung wurde in der Stufe „Hochautomatisiert“ mittels expliziter Kommunikation für das Manöver „Fahrstreifen wechseln“ realisiert. Dieses Manöver war nicht auf alleinige Initiative der Automation durchführbar. Präferierte die kooperative Automation dieses Manöver, so wurde dies dem Fahrer auf einem Display angezeigt. Zur Freigabe der Ausführung des

Manövers „Fahrstreifen wechseln“ musste der Fahrer den Blinker in der entsprechenden Richtung betätigen und leicht in diese Richtung einlenken.

Szenarien und Ablauf der Studie

Nach einer kurzen manuellen Probefahrt zur Gewöhnung an den Simulator führen die Probanden in einer ersten Fahrt mit dem System ohne vorheriges Training oder Erläuterungen (siehe Abbildung 8.13). Diese erste Fahrt war wiederum in einzelne Abschnitte unterteilt. Zuerst fuhren die Probanden frei auf der Autobahn. Es schloss sich ein Teil an, bei denen die Probanden die Kontrolle übernehmen mussten, es wurde dabei aus der Stufe „Hochautomatisiert“ in die Stufe „Assistiert“ geschaltet. Außerdem erfolgte ein Teil zur Evaluierung des Manövers „Fahrstreifen wechseln“, bei dem die Probanden mittels schriftlicher Anweisungen aufgefordert wurden, einen hochautomatisierten Fahrstreifenwechsel durchzuführen. Nach einer Trainingsfahrt mit dem System, die durch eine schriftliche Bedienungsanleitung unterstützt wurde, erfolgte abschließend eine zweite Fahrt mit dem System. Diese Fahrt war analog zur ersten Fahrt in die beschriebenen Abschnitte unterteilt. Den gesamten Ablauf der Studie zeigt Abbildung 8.13 im Überblick.

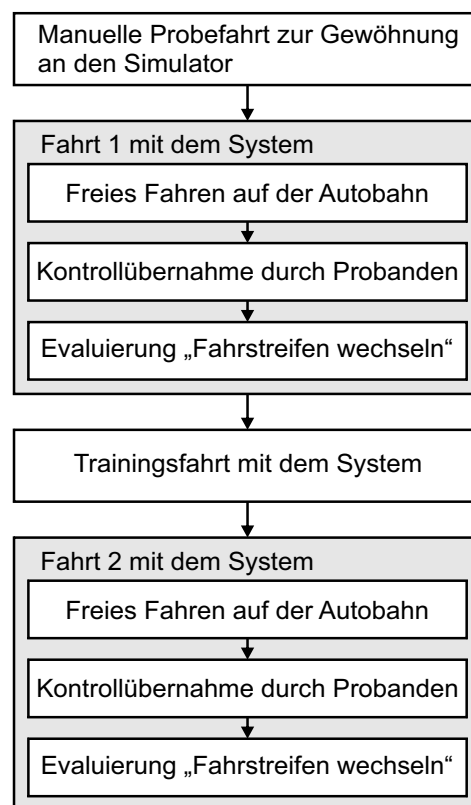


Abbildung 8.13: Beispielstudie 2: Übersicht des Studienablaufes

An der Studie nahmen 8 Probanden im Alter von 25 bis 62 Jahren teil, davon waren 4 Probanden weiblich sowie 4 Probanden männlich. Ihre Fahrerfahrung variierte zwischen 6 und 46 Jahren. Aufgrund der im Rahmen der Auswertung dieser Studie besonders adressierten Fragestellungen zur Evaluierung der kooperativen Automation (siehe Tabelle 8.2) wurden die in den Abbildungen 8.14, 8.15 und 8.16 aufgeführten Aussagen zur Bewertung durch die Probanden ausgewählt. Die in Abbildung 8.14 gezeigten Aussagen wurden den Probanden jeweils nach der vollständigen ersten

sowie vollständigen zweiten Fahrt mit der kooperativen Automation vorgelegt. Die in Abbildung 8.15 dargestellten Aussagen bezüglich der Übernahme der Kontrolle und des hochautomatisierten Fahrstreifenwechsels bewerteten die Probanden nach den jeweiligen diesbezüglichen Teilen der Fahrten. Nachdem sämtliche Fahrten absolviert wurden, erfolgte die abschließende Bewertung der in Abbildung 8.16 gezeigten Aussagen durch die Probanden.

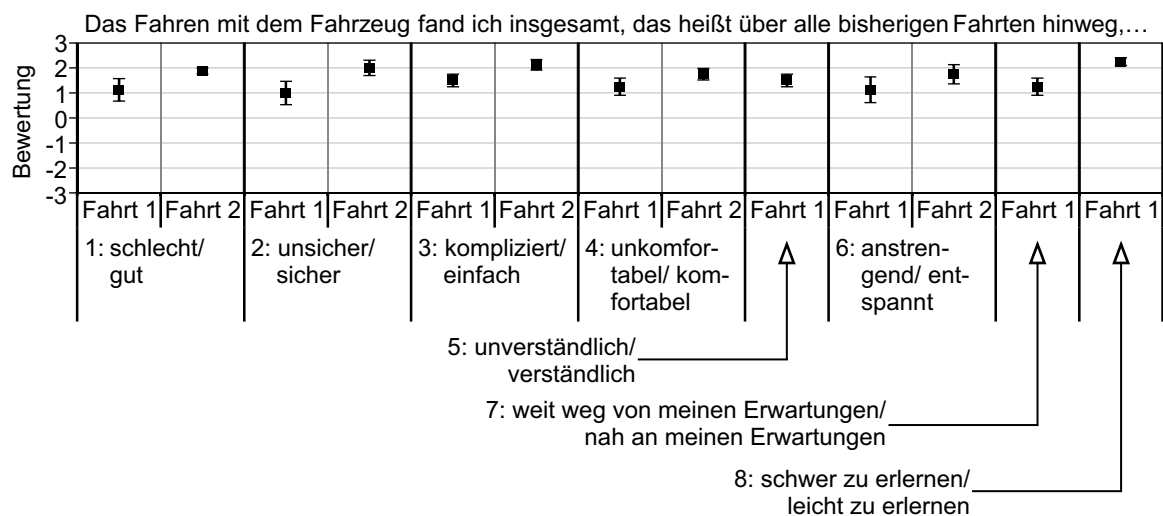


Abbildung 8.14: Beispielstudie 2: Mittelwerte der Bewertungen der Probanden der Aussagen 1 bis 8 für die vollständige erste und zweite Fahrt. Die Fehlerbalken stellen die Standardfehler des Mittelwertes dar.

Ergebnisse

Die Probanden bewerteten das Fahrerlebnis insgesamt gut (Aussage 1, Abbildung 8.14), woraus sich eine gute Akzeptanz der kooperativen Automation folgern lässt. Hinsichtlich der empfundenen Sicherheit (Aussage 2, Abbildung 8.14) ergab sich ebenfalls eine positive Einschätzung der Probanden, so dass sich auf einen empfundenen Sicherheitsgewinn durch die kooperative Automation schließen lässt. Auch die weiteren in Abbildung 8.14 dargestellten Bewertungen (Aussagen 3 bis 8) der Probanden liegen im positiven Bereich. Begründet durch diese können folgende Schlüsse hinsichtlich der kooperativen Automation gezogen werden: Die erreichte Kompatibilität ist gut (begründet durch die Aussagen 3, 4, 5, 7) und der Aufbau eines mentalen Modells bei den Probanden war erfolgreich (begründet durch die Aussagen 3, 5, 8). Des Weiteren konnte nicht erwartungsgemäßes Verhalten vermieden werden (begründet durch die Aussagen 4, 5, 7), woraus sich ein bewirkter Sicherheitsgewinn ergibt. Auch ein Komfortgewinn kann durch eine Entlastung des Fahrers bei der Erfüllung der Fahraufgabe (begründet durch die Aussage 6) und den Aufbau eines Wohlfühles bei den Probanden hinsichtlich der Handlungen der kooperativen Automation (begründet durch die Aussagen 4, 5, 6, 7) erreicht werden. Über sämtliche Aussagen hinweg ist auffällig, dass die Bewertungen der zweiten Fahrt im Vergleich zur ersten Fahrt deutlich verbessert sind. Dies bedeutet einerseits, dass die Probanden nach der Trainingsfahrt über ein besseres Systemverständnis verfügten sowie andererseits, dass sie während des gesamten Studienverlaufes keine gravierenden Enttäuschungen im Kontakt mit der kooperativen Automation erlebten.

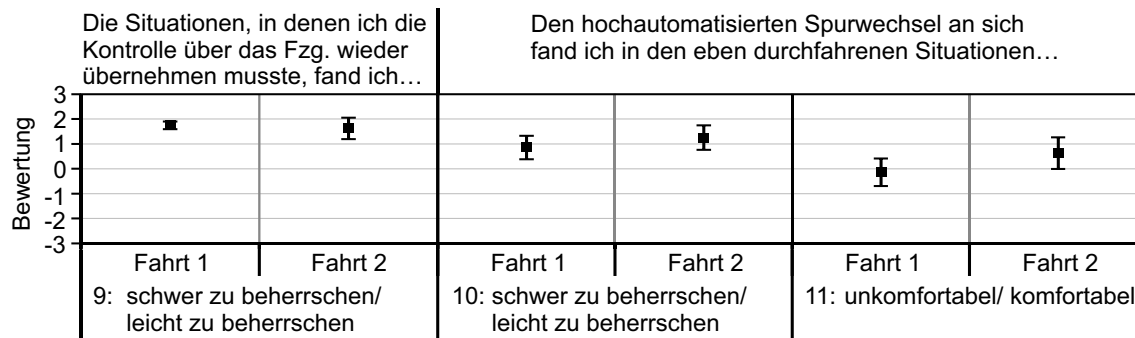


Abbildung 8.15: Beispielstudie 2: Mittelwerte der Bewertungen der Probanden der Aussagen 9 bis 11 für das Übernehmen der Kontrolle und den hochautomatisierten Fahrstreifenwechsel. Die Fehlerbalken stellen die Standardfehler des Mittelwertes dar.

Die Situationen, in denen die Probanden die Kontrolle über das Fahrzeug wieder übernehmen mussten, waren für diese insgesamt leicht zu beherrschen (Aussage 9, Abbildung 8.15). Damit ergeben sich Hinweise, dass die kooperative Automation den Aufbau eines übersteigerten Vertrauens, die „Out-of-the-loop“ Problematik, den Verlust manueller Fähigkeiten sowie die Bildung eines mentalen Abstandes zur Fahraufgabe vermeidet, woraus ein durch die kooperative Automation bewirkter Sicherheitsgewinn resultiert.

Der hochautomatisierte Fahrstreifenwechsel war für die Probanden ebenfalls eher leicht zu beherrschen (Aussage 10, Abbildung 8.15). Der Komfort des Fahrstreifenwechsels wurde allerdings von den Probanden leicht negativ bis leicht positiv bewertet (Aussage 11, Abbildung 8.15). Hier bestand das Problem in der Ruckartigkeit der Initiierung des Fahrstreifenwechsels. Diese wurde vor allem verursacht durch eine starke vom Fahrer zu überdrückende Kraftschwelle auf dem Lenkrad zur Auslösung des hochautomatisierten Fahrstreifenwechsels. Die Ursache der Problematik lag somit im Zusammenwirken der Gestaltung der Interaktionsumsetzung und der automatisierten Ausführung des Manövers. In der auf die Studie folgenden Entwicklungsphase wurde diese Problematik behoben, so dass der Sachverhalt in weiteren Studien nicht mehr negativ auffiel.

Aufgrund der vorgestellten Ergebnisse kann für den Fahrstreifenwechsel gefolgert werden, dass der Aufbau eines übersteigerten Vertrauens und die Bildung eines mentalen Abstandes zur Fahraufgabe vermieden werden. Die erreichte Kompatibilität ist allerdings verbesserungswürdig. Wie bereits angesprochen wurde, konnte diese Problematik im Weiteren erfolgreich behoben werden. Da beim hochautomatisierten Fahrstreifenwechsel auch insbesondere der Fokus auf der gemeinsamen Handlungsplanung und -ausführung liegt, kann aufgrund der Beherrschbarkeit geschlossen werden, dass diese Kooperation ausmachenden Elemente insgesamt gut umgesetzt sind.

Die abschließend von den Probanden abgegebenen Bewertungen sind deutlich positiv, wie in Abbildung 8.16 zu sehen ist. Aufgrund der Aussagen 12 bis 15 kann auf eine hohe Akzeptanz, einen hoch eingeschätzten Nutzen, eine insgesamt gut erreichte Kompatibilität sowie einen hohen Komfort geschlossen werden.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die in dieser Studie adressierten Fragestellungen hinsichtlich der kooperativen Automation (siehe Tabelle 8.2) insgesamt positiv beantwortet werden konnten. Es konnte auf einen unter anderem durch die Vermeidung möglicher Probleme im Zusammenwirken von Fahrer und Automation bewirkten Sicherheitsgewinn durch die kooperative

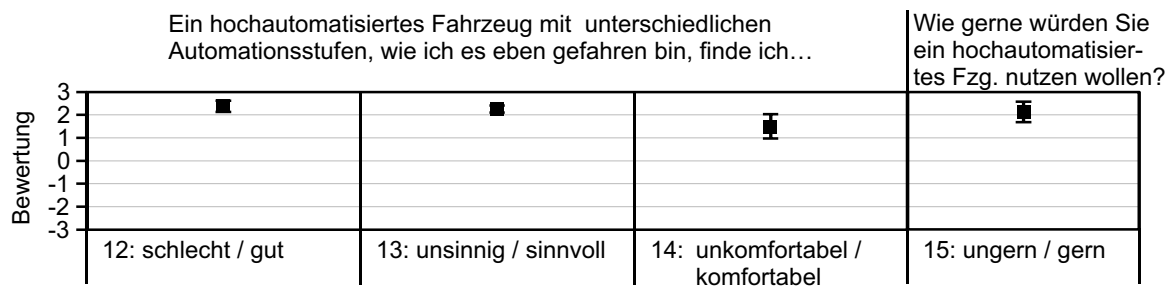


Abbildung 8.16: Beispielstudie 2: Mittelwerte der Bewertungen der Probanden der Aussagen 12 bis 15 nach dem Absolvieren sämtlicher Fahrten. Die Fehlerbalken stellen die Standardfehler des Mittelwertes dar.

Automation sowie einen bewirkten Komfortgewinn geschlossen werden. Bezüglich des bewirkten Sicherheitsgewinnes durch die Vermeidung möglicher Probleme im Zusammenwirken von Fahrer und Automation ist besonders die gute Beherrschbarkeit in den Kontrollübernahmesituationen hervorzuheben. Des Weiteren ergab sich grundsätzlich ein positives Ergebnis bezüglich der evaluierten Kooperation ausmachenden Elemente. Es konnten hier aber auch wertvolle Hinweise zur Verbesserung der Kompatibilität gewonnen werden, die in die weitere Entwicklung eingeflossen sind. Bezüglich der Akzeptanz und des Nutzens der kooperativen Automation ergaben sich ebenfalls positive Bewertungen. Durch den insgesamt erfolgreichen Verlauf der Studie ergibt sich ein deutlicher Hinweis darauf, dass die Umsetzbarkeit des Konzeptes der kooperativen Automation für die Studienszenarien gegeben ist.

Da diese Studie im Rahmen des in der Arbeit angewendeten Entwicklungsprozesses als Usability Untersuchung mit einer geringen Anzahl an Probanden angelegt wurde, ist die Aussagekraft der dargestellten Schlüsse als leicht eingeschränkt zu bewerten. Die Aussagekraft der Ergebnisse reicht aber aus, um in der auf die Studie folgenden Entwicklungsphase zielgerichtet und effizient die kooperative Automation weiter voranbringen zu können. Die Ergebnisse der Untersuchung liefern des Weiteren, gemeinsam mit den Ergebnissen von anderen Studien, einen wichtigen Baustein zur Erlangung einer hohen Aussagekraft hinsichtlich der Fragestellungen dieser Arbeit.

8.3.3 Beispielstudie 3: Fahrstreifenwechsel und manuelle Übernahme der Kontrolle (Versuchsfahrzeug FASCar II)

Die dritte Beispielstudie wurde mit der kooperativen Automation im Versuchsfahrzeug FASCar II (siehe Anhang B.1) auf einem Testgelände durchgeführt. Die Strecke für diese Studie bestand aus einem Rundkurs mit einem einstreifigen Abschnitt mit Kurven und einem zweistreifigen geraden Abschnitt. Auf dem zweistreifigen Abschnitt wurden von der kooperativen Automation gemeinsam mit den Probanden Fahrstreifenwechsel ausgeführt. Außerdem mussten die Probanden auf diesem Abschnitt die manuelle Kontrolle vor einem von der Automation nicht zu erkennenden Hindernis übernehmen und daraufhin einen manuellen Fahrstreifenwechsel ausführen. In Abbildung 8.17 ist ein Proband während der Studie im Versuchsfahrzeug FASCar II zu sehen. Tabelle 8.6 zeigt eine kurze Übersicht der Studie.



Abbildung 8.17: Beispielstudie 3: Proband im Versuchsfahrzeug FASCar II während der Studie

Projekt	Assistenz für Verkehrsteilnehmer
Szenario	Rundkurs mit einem einstreifigen Abschnitt mit Kurven und einem zweistreifigen geraden Abschnitt, dort Fahrstreifenwechsel und Übernahme der Kontrolle durch die Probanden
Umfasste Automatisierungsgrade / Kontrollverteilungen	Driver Only, Teilautomatisiert
Gestaltung der Interaktionsumsetzung	Haptisch mittels eines aktiven Steer-by-Wire Lenksystems
Versuchsplattform	Versuchsfahrzeug FASCar II
Anzahl Probanden	6 (3 weiblich, 3 männlich)
Alter der Probanden	26 bis 34 Jahre, Ø 29 Jahre
Fahrerfahrung der Probanden	9 bis 16 Jahre, Ø 11 Jahre

Tabelle 8.6: Kurzübersicht zu Beispielstudie 3: Fahrstreifenwechsel und manuelle Übernahme der Kontrolle

Gestaltung der Interaktionsumsetzung und Konfiguration der kooperativen Automation

Die Gestaltung der Interaktion mit der kooperativen Automation für diese Studie konzentrierte sich auf die Nutzung der Haptik mittels des Steer-by-Wire-Lenksystems des Versuchsfahrzeuges. Dadurch wurde eine vom Lenkrad unabhängige Ansteuerung der Fahrzeuglenkung durch die kooperative Automation ermöglicht. Die Implementierung der Interaktion erfolgte in der Bearbeitungsstufe Interaktionsumsetzung. Für detailliertere Informationen zur Interaktionsgestaltung siehe [33].

Die Möglichkeiten des Steer-by-Wire-Lenksystems wurden sowohl für die Umsetzung der gemeinsamen Handlungsausführung als auch der gemeinsamen Handlungsplanung ausgenutzt. Für die gemeinsame Handlungsausführung wurde eine variable Kontrollverteilung umgesetzt, welche die gesamte Bandbreite von vollständiger manueller Kontrolle bis zu vollständiger Kontrolle durch die kooperative Automation umfasste. Zur Realisierung der vollständigen Kontrolle durch die kooperative Automation konnte diese die direkte Kontrolle vollständig wahrnehmen ($\lambda_{\delta}^{Automation} = 1$,

$\lambda_{\eta}^{Automation} = 1$). Sie verfügte damit über den direkten Zugriff auf die Stellgrößen des Fahrzeuges und setzte somit das von ihr ausgeführte Manöver direkt um. Von der Interaktionsumsetzung wurde parallel basierend auf dem diesem Manöver zugehörigen Stellaktionspunkt eine haptische Rückmeldung für den Fahrer generiert. Diese führte zu einer dem lateralen Anteil des Stellaktionspunktes analogen Stellung des Lenkrades, falls der Fahrer nicht auf das Lenkrad einwirkte. Für den Fahrer war somit jederzeit das aktuelle Lenkkommando der kooperativen Automation ersichtlich. Im Rahmen dieser Studie wurde zum Vergleich auch eine zweite Variante untersucht, bei der am Lenkrad keine haptische Rückmeldung bezüglich des dem ausgeführten Manöver zugehörigen Stellaktionspunktes erzeugt wurde.

Wirkte der Fahrer so auf das Lenkrad ein, dass der Lenkradwinkel gegenüber dem von der kooperativen Automation anvisierten Lenkradwinkel stark abwich, führte dies zu einem Übergang der Kontrolle zum Fahrer. Um den Übergang der Kontrolle zum Fahrer zu realisieren, wurde der von der Interaktionsumsetzung wahrgenommene Kontrollanteil ($\lambda_{\eta}^{Interaktion}$, $\lambda_{\delta}^{Interaktion}$) erhöht. Da dieser Kontrollanteil durch den Fahrer mittels des Lenkrades und der Pedale erfüllt wurde, übernahm er somit die Kontrolle. Die Stärke der Fahrereinwirkung bestimmte die Geschwindigkeit, mit der die Kontrolle an den Fahrer übergeben wurde. Eine geringe Einwirkung führte zu einer langsamen Kontrollübergabe. Sollte die Kontrolle vollständig beim Fahrer liegen, wurde dies durch die vollständige Wahrnehmung der Kontrolle durch die Interaktionsumsetzung realisiert ($\lambda_{\eta}^{Interaktion} = 1$, $\lambda_{\delta}^{Interaktion} = 1$). Die vom Fahrer eingestellten Stellungen des Lenkrades und der Pedale bestimmten dann ausschließlich die Fahrzeugstellgrößen. Über die haptische Rückmeldung am Lenkrad wurde dem Fahrer weiterhin das von der kooperativen Automation ausgeführte Manöver dargestellt. Die zweite untersuchte Variante unterschied sich dahingehend, dass auch bei dieser Kontrollverteilung keine haptische Rückmeldung am Lenkrad bezüglich des dem ausgeführten Manöver zugehörigen Stellaktionspunktes erzeugt wurde.

Auch der Umsetzung der gemeinsamen Handlungsplanung mittels expliziter Kommunikation diente das Steer-by-Wire-Lenksystem besonders, da es eine von der Fahrzeuglenkung unabhängige haptische Kommunikation zwischen Fahrer und kooperativer Automation am Lenkrad ermöglicht. Für die gemeinsame Manöverplanung wurde im Rahmen der Studie auf das Manöver „Fahrstreifen wechseln“ fokussiert, welches nicht auf alleinige Initiative der Automation durchführbar war. Präferierte die Automation das Manöver „Fahrstreifen wechseln“, so zeigte sie dies durch ein Nicken des Lenkrades in die Richtung des präferierten Fahrstreifenwechsels an. Durch ein kurzes Einlenken in diese Richtung konnte der Fahrer diesem automationspräferierten Manöver zustimmen und somit der kooperativen Automation die Freigabe zur Ausführung des Fahrstreifenwechsels erteilen. Ein kurzes Einlenken während der Ausführung des Fahrstreifenwechsels in die entgegengesetzte Richtung führte zu einem Abbruch des Manövers und der Rückkehr zum Manöver „Fahrstreifen folgen“ auf dem ursprünglichen Fahrstreifen.

Zur Umsetzung der gemeinsamen Handlungsplanung hinsichtlich der Fahrstilparameter wurde ebenfalls das Lenkrad des Steer-by-Wire-Lenksystems genutzt. Mittels eines sehr sanften Einlenkens konnte der Fahrer den von ihm präferierten lateralen Versatz des Eigenfahrzeuges im Fahrstreifen einstellen. Die kooperative Automation verwendete diesen eingestellten Versatz dann im Rahmen des ihr möglichen Maximal- und Minimalversatzes für die weitere Handlungsplanung.

Szenarien und Ablauf der Studie

Der Ablauf der Studie gliederte sich in vier Abschnitte, innerhalb derer jeweils eine unterschiedliche Anzahl von Runden auf dem Rundkurs zu fahren waren (siehe Abbildung 8.18). Abschnitt 1 bestand aus drei Runden, von denen die Probanden die erste Runde zur Eingewöhnung manuell fuhren. In den Runden 2 und 3 wurde die kooperative Automation aktiviert. Die Probanden sollten innerhalb dieser Runden allerdings nicht mit der kooperativen Automation kommunizieren, die Freigabe der Fahrstreifenwechsel erfolgte durch den Versuchsleiter. In Runde 2 wurde von der kooperativen Automation am Lenkrad keine haptische Rückmeldung bezüglich des dem ausgeführten Manövers zugehörigen Stellaktionspunktes generiert. In Runde 3 war diese Funktionalität wieder aktiviert. In Abschnitt 2 fuhren die Probanden eine Runde mit der kooperativen Automation, in der sie die Freigabe des Fahrstreifenwechsels im Rahmen der gemeinsamen Handlungsplanung selbst mittels des Lenkrades ausführen sollten. Die haptische Rückmeldung bezüglich des dem ausgeführten Manövers zugehörigen Stellaktionspunktes war in dieser Runde deaktiviert. Abschnitt 3 gliederte sich in vier Runden. Im gesamten Abschnitt war die haptische Rückmeldung bezüglich des dem ausgeführten Manövers zugehörigen Stellaktionspunktes aktiviert und die Probanden sollten mit der kooperativen Automation kommunizieren. In den Runden 1, 2 und 3 sollten die Probanden das Lenkrad nur für die gemeinsame Handlungsplanung mittels expliziter Kommunikation hinsichtlich des Fahrstreifenwechsels berühren. In den Runden 2 und 3 wurden unterschiedliche Variationen der Parametrierung der haptischen Kommunikation am Lenkrad getestet. In Runde 4 sollten die Probanden während der gesamten Fahrt haptischen Kontakt zum Lenkrad halten. Der abschließende vierte Abschnitt adressierte die Übernahme der Kontrolle durch den Fahrer mit anschließendem manuellen Fahrstreifenwechsel. Dazu wurde auf dem zweistreifigen Abschnitt des Rundkurses ein aus Kartons bestehendes Hindernis platziert, welches für die kooperative Automation nicht zu erkennen war. Um ein frühzeitiges Ausweichen auf den Nachbarfahrstreifen zu verhindern, wurde das Überfahren der in Richtung dieses Fahrstreifens gelegenen Fahrstreifenbegrenzung mittels Leitkegeln verhindert. Erst in einer kurzen Distanz vor dem Hindernis (ca. 7m) wurden keine weiteren Leitkegel aufgestellt und somit der manuelle Fahrstreifenwechsel ermöglicht. Dieses Szenario wurde zunächst zweimal manuell durchfahren. Anschließend erfolgte die Fahrt mit der kooperativen Automation, in der die Probanden die Kontrolle vor dem Hindernis manuell übernehmen sowie daraufhin den Fahrstreifenwechsel manuell durchführen mussten, um eine Kollision zu verhindern. An der Studie nahmen 6 Probanden teil, von denen 3 männlich sowie 3 weiblich waren. Ihr Alter lag zwischen 26 und 34 Jahren (Mittelwert: 29 Jahre), sie besaßen ihren Führerschein zwischen 9 und 16 Jahren (Mittelwert: 11 Jahre).

Aufgrund der im Rahmen der Auswertung dieser Studie besonders adressierten Fragestellungen zur Evaluierung der kooperativen Automation (siehe Tabelle 8.2) wurden die in den Abbildungen 8.19 und 8.20 aufgeführten Fragen zur Beantwortung durch die Probanden ausgewählt. Frage 1 wurde den Probanden nach Abschnitt 1 vorgelegt, Frage 2 nach Abschnitt 2. Frage 3 wurde nach der ersten Runde in Abschnitt 3 beantwortet, Frage 4 nach der Beendigung der letzten Runde in Abschnitt 3. Die Beantwortung der Fragen 5, 6 und 7 erfolgte nach der Beendigung des Abschnittes 4 (siehe auch Abbildung 8.18). Neben den Antworten der Probanden auf die dargestellten Fragen wurden die gefahrenen Bahnen der Probanden bei manueller Übernahme der Kontrolle (Runde 3 in Abschnitt 4) ausgewertet (siehe Abbildung 8.21).

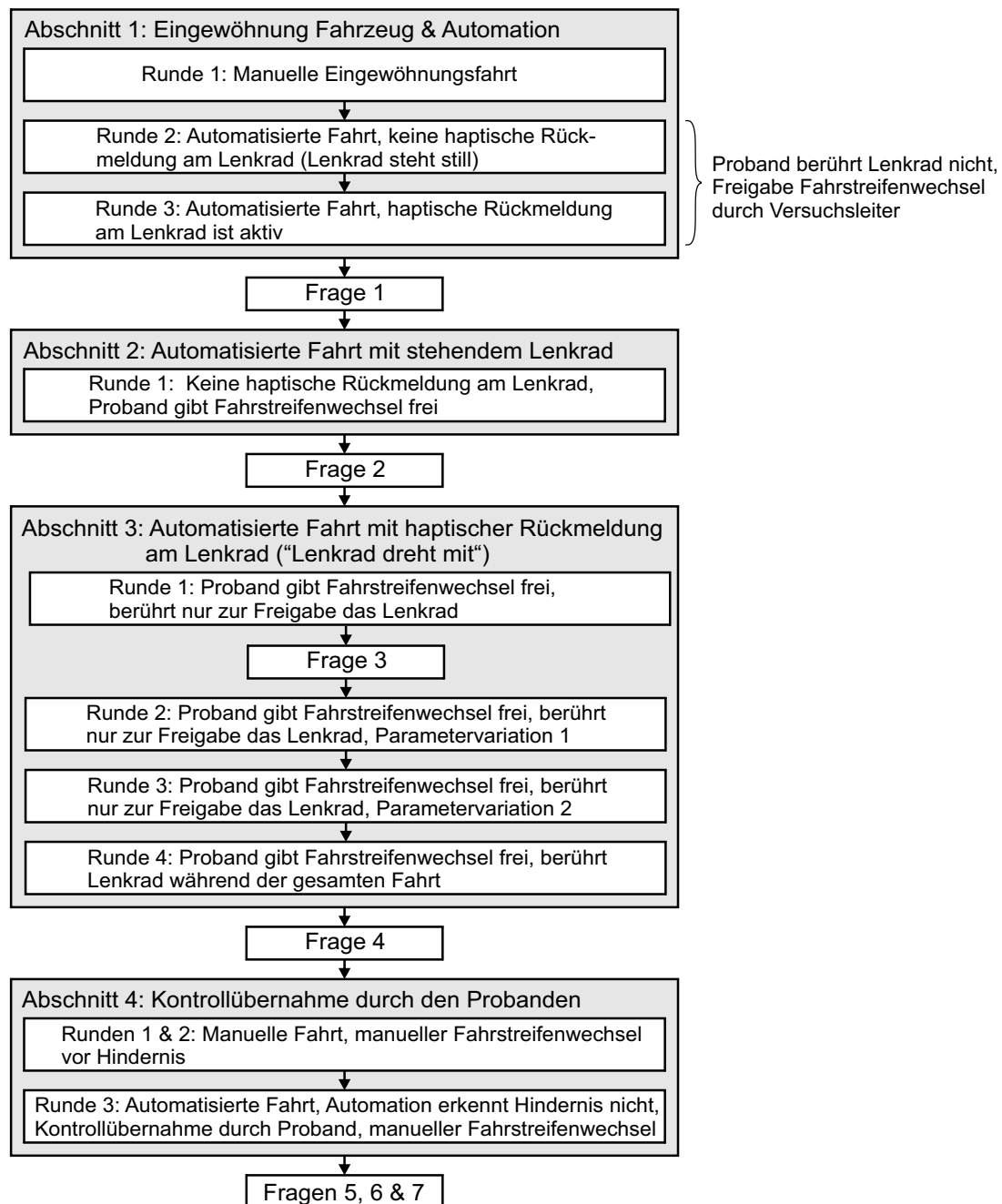


Abbildung 8.18: Beispielstudie 3: Übersicht des Studienablaufes

Ergebnisse

Die Probanden bewerteten das Fahrerlebnis mit der kooperativen Automation nach Abschnitt 1 als deutlich angenehm (Frage 1, Abbildung 8.19). Daher kann auf eine hohe erreichte Kompatibilität, die erfolgreiche Vermeidung nicht erwartungsgemäßen Verhaltens sowie die Entwicklung eines Wohlfühles bei den Probanden hinsichtlich der Handlungen der kooperativen Automation geschlossen werden. Da das Manöver „Fahrstreifen wechseln“ in dieser Studie besonders im Fokus stand, gelten diese Schlüsse insbesondere auch für dieses Manöver.

Die Beantwortung von Frage 2 (siehe Abbildung 8.19) ergab, dass das Auslösen des Fahrstreifenwechsels ohne die haptische Rückmeldung bezüglich des dem ausgeführten Manöver zugehörigen Stellaktionspunktes sehr gut funktionierte. Daraus ergibt sich, dass eine erfolgreiche Umsetzung

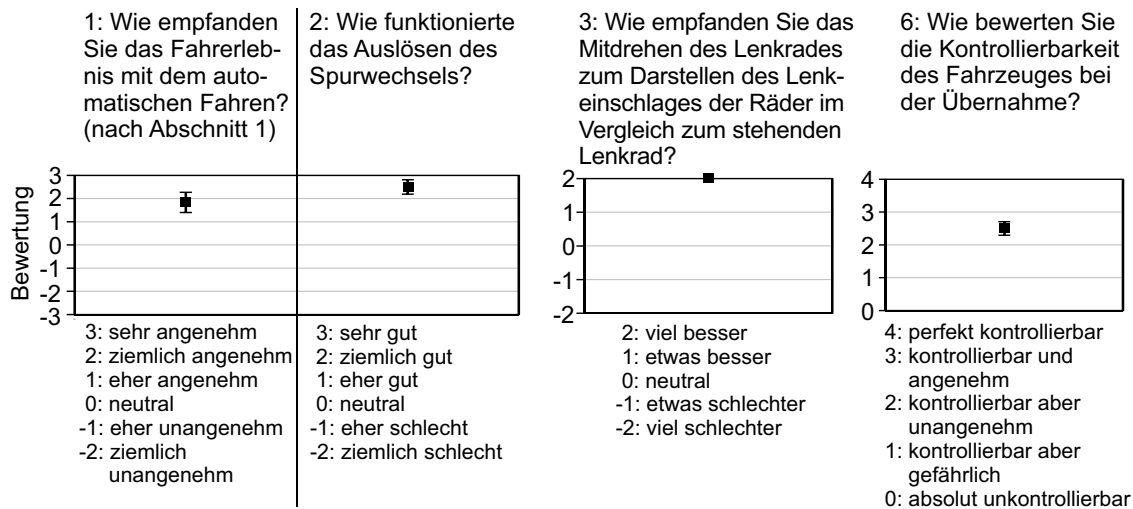


Abbildung 8.19: Beispielstudie 3: Mittelwerte der Antworten der Probanden hinsichtlich der Fragen 1 bis 3 und 6. Die Fehlerbalken stellen die Standardfehler des Mittelwertes dar.

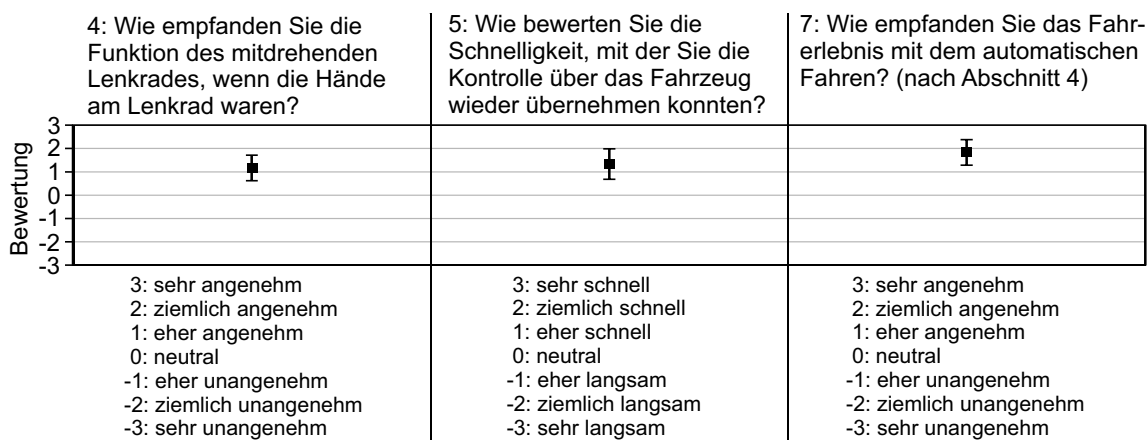


Abbildung 8.20: Beispielstudie 3: Mittelwerte der Antworten der Probanden hinsichtlich der Fragen 5 bis 7. Die Fehlerbalken stellen die Standardfehler des Mittelwertes dar.

der gemeinsamen Handlungsplanung mittels expliziter Kommunikation hinsichtlich des Manövers „Fahrstreifen wechseln“ vorlag.

Die Gestaltung der haptischen Interaktion mit der Rückmeldung bezüglich des dem ausgeführten Manöver zugehörigen Stellaktionspunktes wurde im Vergleich zu der Variante ohne diese Funktionalität von den Probanden als viel besser bewertet (Frage 3, Abbildung 8.19). Als die Probanden angewiesen waren, während der gesamten Runde haptischen Kontakt zum Lenkrad zu halten, empfanden sie darüber hinaus diese Funktionalität als angenehm (Frage 4, Abbildung 8.20). Aufgrund dessen ergeben sich auch hinsichtlich der Stellaktionspunktverläufe eine gut erreichte Kompatibilität sowie eine erfolgreiche Vermeidung nicht erwartungsgemäßen Verhaltens.

In der Übernahmesituation in Abschnitt 4 bewerteten die Probanden die Schnelligkeit, mit der sie die Kontrolle übernehmen konnten, als eher schnell (Frage 5, Abbildung 8.20). Der Mittelwert der Bewertungen der Kontrollierbarkeit in dieser Situation liegt zwischen kontrollierbar aber unangenehm sowie kontrollierbar und angenehm (Frage 6, Abbildung 8.19). Das teilweise unangenehme Gefühl der Probanden begründete sich in der Parametrierung des haptischen Eindrucks am Lenkrad, der Teil der Ausgestaltung der Interaktionsumsetzung war. Die vorgestellten Ergebnisse lassen

insgesamt auf eine gute Kontrollierbarkeit sowie eine funktionierende Umsetzung der gemeinsamen Handlungsausführung schließen. Außerdem ergibt sich damit die Tendenz, dass der Verlust manueller Fähigkeiten von der kooperativen Automation vermieden wird. Die gute Kontrollierbarkeit des Fahrzeuges in dieser Situation wird auch durch die Analyse der gefahrenen Bahnen der einzelnen Probanden deutlich (siehe Abbildung 8.21). Diese zeigen, dass die Probanden das Fahrzeug jederzeit sicher beherrschten und es nicht zu einem Verlassen der Fahrbahn oder zu einer Kollision mit dem Hindernis kam.

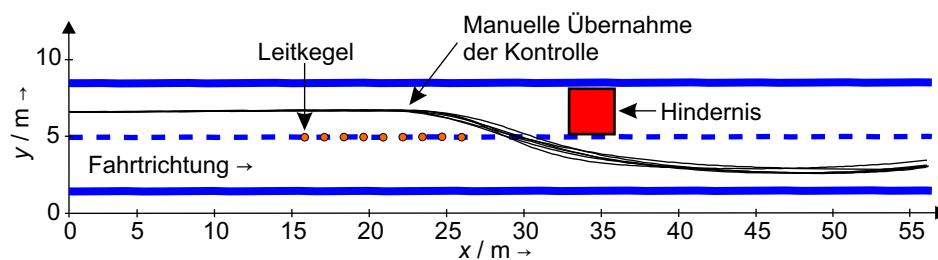


Abbildung 8.21: Beispielstudie 3: Gefahrene Bahnen der Probanden bei manueller Übernahme der Kontrolle vor dem durch die kooperative Automation nicht zu erkennenden Hindernis

Abschließend bewerteten die Probanden noch einmal das Fahrerlebnis mit der kooperativen Automation als deutlich angenehm (Frage 7, Abbildung 8.20). Damit ergibt sich im Vergleich zur Bewertung nach Abschnitt 1 (Frage 1, Abbildung 8.19) eine gleichbleibend positive Bewertung des Fahrerlebnisses, was belegt, dass die Probanden während des gesamten Studienverlaufes keine gravierenden Enttäuschungen im Kontakt mit der kooperativen Automation erlebten. Des Weiteren gelten die aufgrund der Antworten auf Frage 1 gezogenen Schlüsse auch nach der Beendigung sämtlicher Abschnitte der Studie. Dieses sind eine hohe erreichte Kompatibilität, die erfolgreiche Vermeidung nicht erwartungsgemäßen Verhaltens sowie die Entwicklung eines Wohlfühles bei den Probanden hinsichtlich der Handlungen der kooperativen Automation.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die in dieser Studie adressierten konkreten Fragestellungen bezüglich der kooperativen Automation (siehe Tabelle 8.2) im Rahmen der Studienszenarien sehr positiv beantwortet werden konnten. Aufgrund der aufgezeigten Ergebnisse hinsichtlich dieser Fragestellungen kann daher im Einzelnen auf einen unter anderem durch die Vermeidung möglicher Probleme im Zusammenwirken von Fahrer und Automation bewirkten Sicherheitsgewinn sowie einen bewirkten Komfortgewinn geschlossen werden. Des Weiteren ergab sich als Teil der positiven Ergebnisse auch bezüglich der evaluierten Kooperation ausmachenden Elemente ein positives Resultat.

Bei der Beurteilung der Aussagekraft der Ergebnisse muss beachtet werden, dass diese Studie im Rahmen des in der Arbeit angewendeten Entwicklungsprozesses als Usability Untersuchung mit einer geringen Anzahl an Probanden angelegt wurde. Die Ergebnisse der Untersuchung liefern aber, gemeinsam mit den Ergebnissen von anderen Studien, einen wichtigen Baustein zur Erlangung einer insgesamt hohen Aussagekraft hinsichtlich der Fragestellungen dieser Arbeit. Mit den bei dieser Studie erzielten positiven Ergebnissen ergibt sich zudem ein deutlicher Hinweis darauf, dass die Umsetzbarkeit des Konzeptes der kooperativen Automation im Rahmen der Studienszenarien auch in einem Versuchsfahrzeug gegeben ist.

8.4 Zusammenfassung des Kapitels

In diesem Kapitel wurde zunächst der im Rahmen der vorliegenden Arbeit angewendete iterative Entwicklungsprozess erläutert. In diesem wechseln sich stetig Entwicklungs- und Evaluierungsphasen ab. Um die Evaluierungen durchführen zu können, wurde die kooperative Automation prototypisch auf der Grundlage von DOMINION implementiert und in verschiedene Fahrsimulatoren und Versuchsfahrzeuge integriert. Auf die Vorstellung des Entwicklungsprozesses folgte eine Gesamtbetrachtung sämtlicher durchgeführter Evaluierungen. Des Weiteren wurden beispielhaft eine technische Evaluierung sowie drei Usability Untersuchungen mit Probanden im Detail vorgestellt. Mittels der Gesamtbetrachtung der mit der kooperativen Automation durchgeführten 37 technischen Evaluierungen und 17 Usability Untersuchungen mit Probanden konnte dargelegt werden, dass die avisierte Funktionalität der Umsetzung der kooperativen Automation erfolgreich realisiert wurde. Damit wird auch die technische Umsetzbarkeit des Konzeptes der kooperativen Automation bestätigt. Weiterhin zeigt sich dadurch, dass die Konzepte und Methoden zur Umsetzung der kooperativen Automation ausgereift sind. Da das Konzept der kooperativen Automation die Grundlage aller Entwicklungen bildet, kann auch auf eine Ausgereiftheit dessen geschlossen werden. Die Summe der erfolgreichen Evaluierungen und Anwendungen deutet auch auf eine hohe erreichte funktionale Sicherheit und Zuverlässigkeit der Funktionalität hin. Außerdem kann dadurch auf eine hohe Eignung der Konzepte und Methoden für die technische Umsetzung der kooperativen Automation für das teil- und hochautomatisierte Fahren geschlossen werden. Anhand der in diesem Kapitel dargestellten detaillierten Ergebnisse von ausgewählten Evaluierungen konnten diese Aussagen weiter belegt werden.

Bei der detaillierten Analyse einer ausgewählten technischen Evaluierung mit dem Versuchsfahrzeug FASCar II lag ein besonderer Fokus auf der Bearbeitungsebene Manöverplanung. Hier konnte im Detail aufgezeigt werden, dass eine erfolgreiche Realisierung der avisierten Funktionalität erfolgte.

Bei der detaillierten Auswertung der drei beispielhaft ausgewählten Usability Untersuchungen mit Probanden stand die erste zentrale Fragestellung dieser Arbeit im Mittelpunkt. Aufgrund dessen erfolgten die Auswertungen hinsichtlich des durch die kooperative Automation erreichten Potentials, einen Komfort- und Sicherheitsgewinn zu bewirken. Im Kontext des Sicherheitsgewinnes lag aufgrund der ersten zentralen Fragestellung ein besonderes Augenmerk auf dem Potential zur Vermeidung möglicher Probleme im Zusammenwirken von Fahrer und Automation und dem daraus bewirkten Sicherheitsgewinn. Des Weiteren zielten die Auswertungen der Studien auf die Evaluierung der Umsetzung der Kooperation ausmachenden Elemente, der Akzeptanz, des Nutzens und der Umsetzbarkeit der kooperativen Automation ab. Für sämtliche der hier aufgezählten Aspekte ergaben sich bei den Auswertungen der Studien sehr positive Ergebnisse. Insbesondere ergaben sich auch sehr positive Ergebnisse bezüglich der Kompatibilität der gesamten kooperativen Automation sowie der Kompatibilität der umgesetzten Manöver.

In der zweiten Beispielstudie wurden Probleme in der Kompatibilität des Manövers „Fahrstreifen wechseln“ aufgedeckt, die sich durch das Zusammenwirken der Gestaltung der Interaktionsumsetzung und der automatisierten Ausführung des Manövers begründeten. Aufgrund des iterativen Entwicklungsprozesses konnte diese Problematik schnell behoben werden. Eine deutlich positive Bewertung in der dritten Beispielstudie, die danach erfolgte, zeigt dies. Ansonsten wurden kei-

ne die Automationsfunktionalität betreffenden Probleme in den Beispielstudien aufgedeckt. Daher können die Ergebnisse als sehr positiv bewertet und zum Aufzeigen der avisierten Wirkpotentiale herangezogen werden.

Aufgrund der Anlage der Studien als Usability Untersuchungen im Rahmen des iterativen Entwicklungsprozesses konnte die Anzahl der an den einzelnen Studien teilnehmenden Probanden gering gehalten werden. Es wurden jeweils mindestens sechs Probanden ausgewählt und damit die von Nielsen geforderte Mindestanzahl von fünf Probanden für Usability Untersuchungen (siehe [150] und [152]) erfüllt. Die Aussagekraft der Ergebnisse einer einzelnen Usability Untersuchung ist aufgrund der geringen Probandenanzahl generell allerdings eingeschränkt. Dafür ist eine einzelne Untersuchung deutlich kostengünstiger und liefert zur Weiterführung des iterativen Entwicklungsprozesses schneller Ergebnisse. Insbesondere eventuelle Probleme werden schnell gefunden und können behoben werden. Aufgrund der Vielzahl von durchgeführten Usability Untersuchungen kamen insgesamt jedoch sehr viele Probanden mit der kooperativen Automation in Kontakt. Bei einer gemeinsamen Betrachtung der Ergebnisse von mehreren Usability Untersuchungen, wie sie hier erfolgten, kann damit trotzdem eine insgesamt hohe Aussagekraft erreicht werden. Somit kann aufgrund der insgesamt positiven Ergebnisse der drei ausführlich dargestellten Usability Untersuchungen auf ein hohes Wirkpotential hinsichtlich des Gewinnes von Komfort- und Sicherheit sowie der Minimierung von Problemen im Zusammenwirken von Fahrer und Automation geschlossen werden.

Bei der Betrachtung der Ergebnisse einer einzelnen Usability Untersuchung ist zu beachten, dass die konkrete Gestaltung der Interaktionsumsetzung einen relevanten Einfluss auf die Ergebnisse hat. Daher wurden für die detaillierte Analyse Beispielstudien ausgewählt, bei denen die konkreten Gestaltungen der Interaktionsumsetzungen jeweils unterschiedlich waren. Da sich bei sämtlichen dieser Untersuchungen positive Ergebnisse ergaben, resultiert eine Minimierung dieses Einflusses bei der gemeinsamen Betrachtung der Ergebnisse. Somit können die festgestellten positiven Wirkpotentiale der kooperativen Automation unabhängig von der konkreten Ausgestaltung der Mensch-Maschine-Schnittstelle für die im Fokus stehende Automationsfunktionalität als erreicht angesehen werden.

Abschließend erfolgt eine Gesamtbetrachtung aller in diesem Kapitel vorgestellten Ergebnisse: Diese Gesamtbetrachtung basiert sowohl auf der Vielzahl von erfolgreich durchgeführten Evaluierungen als auch auf den gezeigten Detailergebnissen der vier beispielhaft ausgewählten Evaluierungen. Damit kann gezeigt werden, dass die avisierte Funktionalität der Umsetzung realisiert wurde und die technische Umsetzbarkeit des Konzeptes der kooperativen Automation gegeben ist. Weiterhin zeigt sich dadurch, dass sowohl die Konzepte und Methoden zur Umsetzung der kooperativen Automation als auch das Konzept der kooperativen Automation ausgereift sind. Der iterative Entwicklungsprozess kann damit erfolgreich abgeschlossen werden. Außerdem kann dadurch auf eine hohe Eignung der Konzepte und Methoden für die technische Umsetzung der kooperativen Automation für das teil- und hochautomatisierte Fahren geschlossen werden. Aufgrund der Verwendung von verschieden ausgestalteten Interaktionsumsetzungen in den Evaluierungen zeigt sich die Unabhängigkeit von einer bestimmten Ausgestaltung und damit die Relevanz der Ergebnisse für die in dieser Arbeit im Fokus stehende Automationsfunktionalität. Die Summe der erfolgreichen Evaluierungen und Anwendungen weist auch auf eine hohe erreichte funktionale Sicherheit und Zuverlässigkeit der

Funktionalität hin. Insbesondere durch die Gesamtbetrachtung der drei im Detail gezeigten Usability Untersuchungen konnte das Wirkpotential zur Minimierung der Probleme im Zusammenwirken von Mensch und Automation sowie zum Gewinn von Komfort und Sicherheit aufgezeigt werden. Diese Aussagen werden durch die übrigen Usability Untersuchungen weiter untermauert.

Im Vergleich zu anderen Arbeiten konnte durch die vorliegende Arbeit eine durchgängig erfolgreiche Entwicklung von der Konzeption einer Automation für das teil- und hochautomatisierte Fahren mit dem Fokus der gezielten Gestaltung des Zusammenwirkens von Mensch und Automation bis hin zur Umsetzung dieser Automation in der Simulation und im Versuchsfahrzeug erreicht werden. Die hohe Relevanz der Ergebnisse dieser Arbeit wird dabei insbesondere auch durch die große Anzahl an erfolgreichen Evaluierungen und Anwendungen erreicht.

Hinsichtlich der Fragestellungen und Zielsetzungen der vorliegenden Arbeit bietet dieses Kapitel die Bestätigung, dass sowohl die Fragestellungen positiv beantwortet werden können als auch die Zielsetzungen als erreicht angesehen werden können. Die erste zentrale Fragestellung dieser Arbeit „Wie kann ein Konzept für eine kooperative Automation für das teil- und hochautomatisierte Fahren technisch konkret aussehen, welches das Potential aufweist, die Probleme im Zusammenwirken von Mensch und Automation zu minimieren sowie einen Komfort- und Sicherheitsgewinn zu erreichen?“ kann für das vorgeschlagene Konzept der kooperativen Automation unter dem Fokus dieser Arbeit positiv bestätigt werden. Für die zweite zentrale Fragestellung „Welche Konzepte und Methoden eignen sich für die technische Umsetzung der kooperativen Automation für das teil- und hochautomatisierte Fahren?“ kann festgestellt werden, dass sich die vorgestellten Konzepte und Methoden für die technische Umsetzung der kooperativen Automation für das teil- und hochautomatisierte Fahren eignen. Auch die übergeordnete Fragestellung dieser Arbeit „Kann eine kooperative Automation für das teil- und hochautomatisierte Fahren helfen, die Probleme im Zusammenwirken von Mensch und Automation zu minimieren oder zu vermeiden und einen signifikanten Komfort- und Sicherheitsgewinn zu erreichen?“ kann auf Basis der Ergebnisse dieses Kapitels positiv beantwortet werden.

Die folgende Tabelle 8.7 gibt abschließend eine Kurzzusammenfassung des vorliegenden Kapitels 8.

Inhalt des Kapitels
<ul style="list-style-type: none"> • Darstellung des in dieser Arbeit angewendeten iterativen Entwicklungsprozesses • Gesamtbetrachtung sämtlicher durchgeführter Evaluierungen • Detaillierte Analyse einer beispielhaften technischen Evaluierung • Detaillierte Analyse von drei beispielhaft ausgewählten Usability Untersuchungen mit Probanden • Insgesamt Erreichung von positiven Ergebnissen bei den Evaluierungen
Beitrag zum Stand der Technik
<ul style="list-style-type: none"> • Aufzeigen der Erfüllung der avisierten Ziele des Konzeptes der kooperativen Automation, seiner technischen Konkretisierung und der Konzepte und Methoden zur Umsetzung und damit Darlegung der Relevanz dieser Arbeit • Aufzeigen der durchgängig erfolgreichen Entwicklung von der Konzeption einer Automation für das teil- und hochautomatisierte Fahren mit dem Fokus der gezielten Gestaltung des Zusammenwirkens von Mensch und Automation bis hin zur Umsetzung dieser Automation in der Fahrsimulation und im Versuchsfahrzeug
Stand bezüglich der Fragestellungen der Arbeit
<p>Fragestellung 1: „Wie kann ein Konzept für eine kooperative Automation für das teil- und hochautomatisierte Fahren technisch konkret aussehen, welches das Potential aufweist, die Probleme im Zusammenwirken von Mensch und Automation zu minimieren sowie einen Komfort- und Sicherheitsgewinn zu erreichen?“</p> <p>Erreichter Stand hinsichtlich der Beantwortung der Fragestellung 1:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Vollständig beantwortet durch die Evaluierungen des allgemeinen Konzeptes der kooperativen Automation (siehe Kapitel 3) und seiner technischen Konkretisierung (siehe Kapitel 4) hinsichtlich der avisierten Wirkpotentiale
<p>Fragestellung 2: „Welche Konzepte und Methoden eignen sich für die technische Umsetzung der kooperativen Automation für das teil- und hochautomatisierte Fahren?“</p> <p>Erreichter Stand hinsichtlich der Beantwortung der Fragestellung 2:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Vollständig beantwortet durch die Evaluierungen der in dieser Arbeit vorgestellten Konzepte und Methoden zur technischen Umsetzung der kooperativen Automation (siehe Kapitel 5, Kapitel 6 und Kapitel 7) hinsichtlich der Erfüllung der avisierten Funktionalität

Tabelle 8.7: Kurzzusammenfassung von Kapitel 8

9 Zusammenfassung, Diskussion und Ausblick

9.1 Zusammenfassung und Diskussion

Teil- und hochautomatisiertes Fahren erfordert eine Einbeziehung des Fahrers in die Bearbeitung der Fahraufgabe. Daher ergibt sich ein Zusammenwirken von Fahrer und Automation bei der Fahraufgabenbearbeitung. Dieses Zusammenwirken muss gezielt gestaltet werden, da der durch die Automatisierung erhoffte Komfort- und Sicherheitsgewinn anderenfalls nicht erreicht werden und es außerdem zu einer Minimierung des bereits erreichten Komfort- und Sicherheitsniveaus kommen kann. Die Betrachtung von in der Literatur beschriebenen Problemen beim Einsatz einer hohen Automatisierung führte daher auf die übergeordnete Fragestellung dieser Arbeit: „Wie kann eine Automation für das teil- und hochautomatisierte Fahren gestaltet werden, so dass die aufgezeigten Probleme im Zusammenwirken von Mensch und Automation minimiert oder vermieden werden und ein signifikanter Komfort- und Sicherheitsgewinn erreicht wird?“ Der Ansatz der vorliegenden Arbeit zur Beantwortung dieser Fragestellung war die kooperative Gestaltung des Zusammenwirkens von Fahrer und Automation. Dadurch ergab sich die Präzisierung der übergeordneten Fragestellung der Arbeit: „Kann eine kooperative Automation für das teil- und hochautomatisierte Fahren helfen, die Probleme im Zusammenwirken von Mensch und Automation zu minimieren oder zu vermeiden und einen signifikanten Komfort- und Sicherheitsgewinn zu erreichen?“

Die Zielsetzung der Arbeit lag in der ausführlichen Auseinandersetzung mit der Idee der kooperativen Automation für das teil- und hochautomatisierte Fahren aus ingenieurwissenschaftlicher Perspektive. Dies umfasste die detaillierte Darstellung des allgemeinen Konzeptes, die darauf aufbauende technische Konkretisierung dieses Konzeptes, die Beschreibung von Ansätzen zur technischen Umsetzung und den Nachweis der Umsetzbarkeit sowie des Nutzens. Der Fokus lag dabei auf der Automationsfunktionalität. Daher war die Zielsetzung hinsichtlich der Mensch-Maschine-Schnittstelle die Beschreibung von Konzepten und Methoden zur Bereitstellung verschiedenster Kommunikationsmöglichkeiten, nicht die Beschreibung der konkreten Ausgestaltung der Schnittstelle. Da die konkrete Ausgestaltung der Mensch-Maschine-Schnittstelle einen erheblichen Einfluss auf die Wirkung der kooperativen Automation beim Fahrer hat, zielte die Arbeit auf die Bereitstellung eines möglichst großen positiven Wirkpotentials hinsichtlich der Vermeidung von Problemen im Zusammenwirken von Mensch und Automation und der Erreichung eines signifikanten Komfort- und Sicherheitsgewinnes ab.

Damit ergaben sich die zwei von der übergeordneten Fragestellung abgeleiteten zentralen Fragestellungen der Arbeit: „Wie kann ein Konzept für eine kooperative Automation für das teil- und hochautomatisierte Fahren technisch konkret aussehen, welches das Potential aufweist, die Probleme im Zusammenwirken von Mensch und Automation zu minimieren sowie einen Komfort- und Sicherheitsgewinn zu erreichen?“ und „Welche Konzepte und Methoden eignen sich für die technische Umsetzung der kooperativen Automation für das teil- und hochautomatisierte Fahren?“ Im

Weiteren werden die Ergebnisse der Arbeit anhand dieser Fragestellungen zusammengefasst und diskutiert.

Wie kann ein Konzept für eine kooperative Automation für das teil- und hochautomatisierte Fahren technisch konkret aussehen, welches das Potential aufweist, die Probleme im Zusammenwirken von Mensch und Automation zu minimieren sowie einen Komfort- und Sicherheitsgewinn zu erreichen?

Um die erste zentrale Fragestellung der Arbeit beantworten zu können, erfolgten zunächst die detaillierte Darstellung des allgemeinen Konzeptes sowie die darauf aufbauende technische Konkretisierung.

Das allgemeine Konzept der kooperativen Automation zur teil- und hochautomatisierten Fahrzeugführung wurde mittels einer grundlegenden Definition von kooperativer Automation und der Konzipierung einzelner Kooperation ausmachender Elemente detailliert ausgearbeitet. Die einzelnen Kooperation ausmachenden Elemente sind: Kompatibilität, gemeinsame Weiterentwicklung der Ziele und Werte, gemeinsamer Aufbau des Situationsbewusstseins, gemeinsame Handlungsplanung, gemeinsame Handlungsausführung, mentale Modelle, Kommunikation, Rolle und Entscheidungsspielraum und Zustandsüberwachung. Durch die Ausarbeitung der Kooperation ausmachenden Elemente wurde eine strukturierte Herangehensweise bei der Ausformulierung des Konzeptes erreicht sowie die Grundlage für eine strukturierte und damit gut handhabbare Anwendung des Konzeptes geschaffen. Sämtliche Betrachtungen erfolgten gezielt für das teil- und hochautomatisierte Fahren, jedoch unabhängig von einer konkreten Umsetzung, wodurch eine vielfältige Anwendbarkeit der Ideen auch außerhalb der in dieser Arbeit vorgeschlagenen Umsetzung gewährleistet wird. Bei einer kritischen Reflexion des Konzeptes wurde das hohe Potential bezüglich der Minimierung von Problemen im Zusammenwirken von Fahrer und Automation und des Gewinnes von Komfort und Sicherheit dargelegt und damit gezeigt, dass das Konzept den Zielen der Arbeit standhalten kann. Die wesentliche Neuheit des vorgestellten Konzeptes der kooperativen Automation ist die strukturierte und detaillierte Ausarbeitung der Kooperationsidee für das teil- und hochautomatisierte Fahren.

Bei der auf dem allgemeinen Konzept aufbauenden technischen Konkretisierung der kooperativen Automation für das teil- und hochautomatisierte Fahren lag der Fokus auf der Konkretisierung der Kooperation ausmachenden Elemente Kompatibilität, gemeinsame Handlungsplanung, gemeinsame Handlungsausführung und Kommunikation. Diese Elemente wurden aufgrund der Zielsetzungen der Arbeit ausgewählt. Als eine Grundlage für die Realisierung der gemeinsamen Handlungsplanung von Fahrer und kooperativer Automation wurde das Valentialkonzept zur Bewertung von Handlungen vorgestellt. Des Weiteren wurden eine funktionale Systemarchitektur für die kooperative Automation sowie Repräsentationen des Automationsverhaltens zur gemeinsamen Handlungsplanung und -ausführung ausgearbeitet. Abschließend wurde im Rahmen der technischen Konkretisierung eine Vorgehensweise zur Entwicklung kompatibler Ziele, Werte und Methoden für die kooperative Automation beschrieben. Die technische Konkretisierung ist ein unabdingbarer Schritt hin zu einer technischen Umsetzung des Konzeptes der kooperativen Automation. Aufgrund der ingenieurwissenschaftlichen Perspektive der Arbeit ist diese Konkretisierung des Konzeptes zwingend erforderlich. Einerseits wird so die Grundlage für die im Rahmen dieser Arbeit erarbeitete

Umsetzung der kooperativen Automation geschaffen. Andererseits erfolgt damit ebenso die Bereitstellung einer Grundlage für andere Umsetzungen einer kooperativen Automation, da die Überlegungen unabhängig von einer bestimmten Realisierung gehalten sind. Die geschaffene Grundlage für Umsetzungen einer kooperativen Automation bildet die wesentliche Neuheit der technischen Konkretisierung.

Bei der Erarbeitung des allgemeinen Konzeptes der kooperativen Automation und seiner technischen Konkretisierung wurde ein iterativer Entwicklungsprozess angewendet. In diesem wechselten sich stetig Entwicklungs- und Evaluierungsphasen ab. In den Evaluierungsphasen wurden hinsichtlich der ersten zentralen Fragestellung dieser Arbeit Usability Untersuchungen mit Probanden durchgeführt, die begründet durch die Zielsetzungen dieser Arbeit auf die Automationsfunktionalität fokussierten. Aufgrund der Anlage als Usability Untersuchungen konnte die Anzahl der an den einzelnen Studien teilnehmenden Probanden gering gehalten werden. Die Aussagekraft der Ergebnisse einer einzelnen Usability Untersuchung ist dadurch allerdings eingeschränkt. Dafür ist eine einzelne Untersuchung deutlich kostengünstiger und liefert zur Weiterführung des iterativen Entwicklungsprozesses schneller Ergebnisse. Insgesamt wurden 17 Usability Untersuchungen mit der kooperativen Automation durchgeführt. In der vorliegenden Arbeit erfolgte eine Gesamtbetrachtung sämtlicher Usability Untersuchungen und die detaillierte Analyse der Ergebnisse von drei beispielhaft ausgewählten Untersuchungen. Durch die gemeinsame Betrachtung der Ergebnisse der Usability Untersuchungen wurde trotzdem eine insgesamt hohe Aussagekraft erreicht. Insbesondere durch die gemeinsame Betrachtung der drei im Detail analysierten Usability Untersuchungen konnte das hohe Wirkpotential zur Minimierung der Probleme im Zusammenwirken von Mensch und Automation sowie zum Gewinn von Komfort und Sicherheit aufgezeigt werden. Diese Aussagen wurden durch die übrigen Usability Untersuchungen weiter untermauert. Des Weiteren wurden in den Studien positive Ergebnisse hinsichtlich der Akzeptanz, des Nutzens und der Umsetzbarkeit der kooperativen Automation erzielt. Aufgrund der Verwendung von verschieden ausgestalteten Interaktionsumsetzungen in den Evaluierungen zeigte sich die Unabhängigkeit von einer bestimmten Ausgestaltung und damit die Relevanz der Ergebnisse für die im Fokus stehende Automationsfunktionalität.

Mit der detaillierten Darstellung des allgemeinen Konzeptes, der darauf aufbauenden technischen Konkretisierung sowie der erfolgreichen Evaluierung in einer Vielzahl von Usability Untersuchungen mit Probanden kann die erste zentrale Fragestellung dieser Arbeit für das vorgeschlagene Konzept der kooperativen Automation vollständig positiv beantwortet werden.

Welche Konzepte und Methoden eignen sich für die technische Umsetzung der kooperativen Automation für das teil- und hochautomatisierte Fahren?

Zur Beantwortung der zweiten zentralen Fragestellung der Arbeit wurden basierend auf dem allgemeinen Konzept der kooperativen Automation sowie dessen technischer Konkretisierung Ansätze zur technischen Umsetzung der kooperativen Automation ausgearbeitet. Die Betrachtung einzelner Manöver zur Strukturierung des Fahrtablaufes bildete die Grundlage für die Erarbeitung der Ansätze. Im Einzelnen umfassten diese ein Gesamtkonzept zur manöverbasierten Umsetzung der kooperativen Automation, ein Konzept zur Umsetzung der Bearbeitungsebene Manöverplanung sowie die detaillierte Modellierung des Manövers „Fahrstreifen wechseln“. Die vorgestellten Ansätze

adressierten insbesondere die Umsetzung der Kooperation ausmachenden Elemente Kompatibilität, gemeinsamer Aufbau des Situationsbewusstseins, gemeinsame Handlungsplanung, gemeinsame Handlungsausführung, Kommunikation sowie Rolle und Entscheidungsspielraum. Aufgrund des Umfanges des Konzeptes der kooperativen Automation wurde bei der Ausarbeitung der Ansätze zur Umsetzung gemäß den Zielsetzungen der Arbeit auf die aufgeführten Bereiche fokussiert.

Im Rahmen der Vorstellung des Gesamtkonzeptes zur manöverbasierten Umsetzung wurde zunächst die objektorientierte Modellierung der Manöver dargestellt. Gemäß den Zielsetzungen der Arbeit wurden auf dieser Grundlage konkrete Manöver für die Bewältigung des Autobahnszenarios entworfen. Es erfolgte außerdem die Beleuchtung des weiteren objektorientierten Softwareentwurfes für die Umsetzung der kooperativen Automation und der Einbettung der objektorientierten Modellierung der Manöver in diesen Softwareentwurf. Abschließend erfolgte die Erläuterung des unter Verwendung des objektorientierten Softwareentwurfes konzipierten Softwareablaufes für die manöverbasierte Umsetzung. Durch das Gesamtkonzept zur manöverbasierten Umsetzung wird gemäß den Zielsetzungen der Arbeit erreicht, dass sämtliche Funktionalität in einem integrierten System vorliegt. Die Vorteile der manöverbasierten Umsetzung sind die zentrale Modellierung sämtlicher für ein Manöver benötigter Fähigkeiten innerhalb dieses Manövers sowie die einfache Erweiterbarkeit des von der Automation umfassten Verhaltens- und Situationsumfanges durch das Hinzufügen von Manövern. Durch die zentrale Modellierung sämtlicher Fähigkeiten innerhalb des Manövers wird ein zentraler Zugriffspunkt für sämtliche hinsichtlich eines Manövers relevanten Informationen zur Gestaltung der Kommunikation mit dem Fahrer geboten. Außerdem kann so gezielt innerhalb eines Manövers die Modellierung erweitert oder verändert werden, ohne andere Manöver zu beeinflussen. Als wesentliche Neuheit wird durch das erarbeitete Gesamtkonzept ein umfassendes Konzept zur technischen Umsetzung der kooperativen Automation für das teil- und hochautomatisierte Fahren geboten, bei dem die Umsetzung des Kooperationsgedankens und seiner Teilaspekte konsequent im Fokus steht. Da die technische Umsetzung der kooperativen Automation von Grund auf neu entwickelt wurde, kann die konsequente Fokussierung auf die Umsetzung der Kooperation bzw. der Kooperation ausmachenden Elemente erreicht werden. Dadurch gelingt, im Gegensatz zu einer deutlich aufwändigeren nachträglichen Erweiterung einer bestehenden Automation, eine möglichst umfassende und zielgerichtete Umsetzung des Kooperationsgedankens.

Aufbauend auf dem Gesamtkonzept zur manöverbasierten Umsetzung der kooperativen Automation wurde im Weiteren ein Ansatz zur Umsetzung der Bearbeitungsebene Manöverplanung vorgestellt. Dabei wurde zunächst die für den Aufbau des Manöverbaumes entwickelte Vorgehensweise beschrieben. Diese integriert die Erkennung des aktuell vom Fahrzeug gefahrenen Manövers, die Bestimmung der durchführbaren Manöver sowie die Ermittlung der Präferenzen der Automation hinsichtlich des auszuführenden Manövers. Zur Erfüllung dieser Aufgaben wurden auf der Fuzzy Logik basierende Methoden ausgearbeitet. Die Fuzzy Logik eignet sich gut dazu, da sie die intuitive Modellierung von explizit vorhandenem Wissen durch die Gestaltung von Zugehörigkeitsfunktionen der relevanten Parameter und die Formulierung von Regeln mittels natürlichsprachlicher Begriffe ermöglicht. Der Aufbau des Manöverbaumes bildet mittels der entwickelten Methoden eine zentrale Grundlage für die Umsetzung der gemeinsamen Handlungsplanung und -ausführung in der kooperativen Automation. Bei der Ausarbeitung der Methoden lag ein besonderer Fokus auf der Umsetzung des Kooperation ausmachenden Elementes Kompatibilität. Im Anschluss wurde auf die

Umsetzung der Kooperation ausmachenden Elemente gemeinsame Handlungsplanung, Rolle und Entscheidungsspielraum sowie Kommunikation auf der Bearbeitungsebene Manöverplanung eingegangen. Es wurden dazu die Berücksichtigung des Entscheidungsspielraumes hinsichtlich des auszuführenden Manövers sowie die Ermöglichung der gemeinsamen Manöverplanung mittels impliziter und expliziter Kommunikation beleuchtet. Die wesentliche Neuheit des Konzeptes zur Umsetzung der Bearbeitungsebene Manöverplanung liegt in der Darstellung eines detaillierten Konzeptes zur Umsetzung der Kooperation zwischen Automation und Fahrer auf der Bearbeitungsebene Manöverplanung für das teil- und hochautomatisierte Fahren. Dieses wird durch verschiedene neuartige Ansätze zur Umsetzung der genannten Kooperation ausmachenden Elemente gebildet, deren Umsetzung im Mittelpunkt des Konzeptes steht.

Basierend auf dem Gesamtkonzept zur manöverbasierten Umsetzung der kooperativen Automation sowie des Konzeptes zur Umsetzung der Bearbeitungsebene Manöverplanung wurden anschließend gemäß den Zielsetzungen der Arbeit exemplarisch einige Aspekte der detaillierten Modellierung des Manövers „Fahrstreifen wechseln“ dargestellt. Ein besonderer Fokus lag dabei auf der Umsetzung des Kooperation ausmachenden Elementes Kompatibilität. Auf der Grundlage der Definition des Manövers „Fahrstreifen wechseln“ wurden die Elemente Ausprägung, Phase und Anlass der Modellierung des Manövers auf der Bearbeitungsebene Manöverplanung beschrieben. Im Anschluss wurden die Modellierung der von der kooperativen Automation benötigten Fähigkeiten zur Manöverplanung für das Manöver „Fahrstreifen wechseln“ sowie Anforderungen an einen Trajektorienplanungsalgorithmus für das Manöver vorgestellt. Die konkreten Überlegungen zur Modellierung des Manövers „Fahrstreifen wechseln“ verdeutlichen exemplarisch die entwickelte neuartige allgemeine Modellierung der Manöver sowie die erstellte neuartige Methode zur Umsetzung der Manöverplanung und zeigen ihre praktische Anwendbarkeit sowie ihre Handhabbarkeit auf.

Die Erarbeitung der Konzepte und Methoden zur Umsetzung der kooperativen Automation erfolgte gemeinsam mit der Erarbeitung des allgemeinen Konzeptes der kooperativen Automation und seiner technischen Konkretisierung in einem integrierten iterativen Entwicklungsprozess. In diesem wechselten sich stetig Entwicklungs- und Evaluierungsphasen ab. In den Evaluierungsphasen wurden technische Evaluierungen durchgeführt, die gezielt die zweite zentrale Fragestellung dieser Arbeit adressierten. Zusätzlich wurde diese Fragestellung auch in den Usability Untersuchungen mit Probanden adressiert. Insgesamt wurden mit der kooperativen Automation 37 technische Evaluierungen und 17 Usability Untersuchungen erfolgreich durchgeführt. Um die Eignung der vorgestellten Konzepte und Methoden zur Umsetzung der kooperativen Automation zu ermitteln, erfolgte sowohl eine Gesamtbetrachtung sämtlicher Evaluierungen als auch die detaillierte Analyse von vier beispielhaft ausgewählten Evaluierungen. Damit konnte gezeigt werden, dass die avisierte Funktionalität der Umsetzung realisiert wurde und die technische Umsetzbarkeit des Konzeptes der kooperativen Automation gegeben ist. Weiterhin zeigte sich dadurch, dass die Konzepte und Methoden zur Umsetzung der kooperativen Automation ausgereift sind und sie sich für die technische Umsetzung der kooperativen Automation für das teil- und hochautomatisierte Fahren gut eignen. Bei der Analyse einer ausgewählten, mit dem Versuchsfahrzeug FASCar II durchgeführten technischen Evaluierung konnte im Detail eine erfolgreiche Umsetzung der Bearbeitungsebene Manöverplanung sowie des Manövers „Fahrstreifen wechseln“ aufgezeigt werden. Die Summe der

erfolgreichen Evaluierungen weist auch auf eine hohe erreichte funktionale Sicherheit und Zuverlässigkeit der Funktionalität hin.

Mit den vorgestellten Ansätzen zur technischen Umsetzung der kooperativen Automation sowie der erfolgreichen Evaluierung dieser Ansätze kann die zweite zentrale Fragestellung vollständig positiv beantwortet werden: Es wurden Konzepte und Methoden vorgestellt, die sich für die technische Umsetzung der kooperativen Automation für das teil- und hochautomatisierte Fahren eignen.

Kann eine kooperative Automation für das teil- und hochautomatisierte Fahren helfen, die Probleme im Zusammenwirken von Mensch und Automation zu minimieren oder zu vermeiden und einen signifikanten Komfort- und Sicherheitsgewinn zu erreichen?

Auf der Grundlage der Beantwortung der beiden zentralen Fragestellungen der Arbeit kann auch die übergeordnete Fragestellung unter Berücksichtigung der Zielsetzungen beantwortet werden. Aufgrund der Zielsetzungen sind dabei sowohl die ingenieurwissenschaftliche Perspektive als auch die Automationsfunktionalität als Fokus der Arbeit zu berücksichtigen.

Wie mittels der Usability Untersuchungen mit Probanden gezeigt werden konnte, kann eine kooperative Automation für das teil- und hochautomatisierte Fahren helfen, die Probleme im Zusammenwirken von Mensch und Automation zu minimieren oder zu vermeiden und einen signifikanten Komfort- und Sicherheitsgewinn zu erreichen. Dieses Ergebnis gilt für die im Fokus stehende Automationsfunktionalität, welche die entsprechenden positiven Wirkpotentiale bereitstellt, die von einer vorteilhaft ausgestalteten Mensch-Maschine-Schnittstelle ausgenutzt werden müssen. Im Speziellen gilt dieses Ergebnis natürlich für die umgesetzte kooperative Automation, für welche die positiven Wirkpotentiale konkret aufgezeigt werden konnten.

Da das Konzept der kooperativen Automation aber allgemein gehalten ist und die Usability Untersuchungen mit Probanden gerade auch die Evaluierung des Konzeptes bzw. der einzelnen Kooperation ausmachenden Elemente als Bestandteile des Konzeptes adressierten, kann das Ergebnis auch generalisiert werden. Insbesondere die beschriebenen Kooperation ausmachenden Elemente bieten aufgrund der strukturierten Ausarbeitung von Kooperation auch für andersartige Umsetzungen einer kooperativen Automation eine optimale Grundlage. Die in dieser Arbeit festgestellten positiven Ergebnisse hinsichtlich ihrer Wirkpotentiale begründen die Annahme, dass bei einer vorteilhaften Umsetzung ähnlich positive Effekte erzielt werden können.

Aufgrund der in dieser Arbeit erfolgten ausführlichen Auseinandersetzung mit der Idee der kooperativen Automation für das teil- und hochautomatisierte Fahren von der Konzeption über die Umsetzung bis hin zur Evaluierung in Fahrsimulatoren und Versuchsfahrzeugen ergibt sich eine hohe Aussagekraft der erzielten Ergebnisse aus ingenieurwissenschaftlicher Perspektive. Es bietet sich dadurch eine gute Grundlage für weiterführende Arbeiten, um die Idee der kooperativen Automation weiter auszuarbeiten sowie sie zur Produktreife weiterzuentwickeln.

9.2 Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit erfolgte die ausführliche Auseinandersetzung mit der Idee der kooperativen Automation für das teil- und hochautomatisierte Fahren aus ingenieurwissenschaftlicher

Perspektive. Dies umfasste die detaillierte Darstellung des allgemeinen Konzeptes, die technische Konkretisierung dieses Konzeptes, die Beschreibung von Ansätzen zur technischen Umsetzung sowie die Evaluierung des Konzeptes und der Umsetzung. Aufgrund des Umfanges des Konzeptes wurde in dieser Arbeit bei den auf dem allgemeinen Konzept aufbauenden Schritten auf anhand der Zielsetzungen ausgewählte Bereiche fokussiert. Ein erstes Arbeitsfeld für weiterführende Arbeiten ist daher die Ausarbeitung bisher nicht bearbeiteter Bereiche, die im Folgenden dargestellt werden.

Hier ist zuerst die technische Konkretisierung sowie die Erarbeitung von Ansätzen zur Umsetzung von Kooperation ausmachenden Elementen zu nennen, die im Rahmen dieser Arbeit nicht detailliert bearbeitet worden sind, wie zum Beispiel die Elemente gemeinsame Weiterentwicklung der Ziele und Werte sowie Zustandsüberwachung. Des Weiteren sollte die im Rahmen der technischen Konkretisierung beschriebene Bearbeitungsebene Navigation weiter ausgearbeitet und Konzepte und Methoden zu ihrer Umsetzung entwickelt werden. Erste Ansätze dazu wurden bereits in [126] vorgestellt. Da bei der Beschreibung von Konzepten und Methoden zur Umsetzung der Fokus auf der Bearbeitungsebene Manöverplanung lag, sollte eine tiefergehende Auseinandersetzung mit den Bearbeitungsebenen (Kurzzeit-) Trajektorienplanung und Steuerung / Regelung erfolgen, um auch auf diesen Ebenen die Kooperation auszuarbeiten. Außerdem sollten weitere Manöver hinzugefügt werden, um zum Beispiel auch urbane Szenarien bewältigen zu können. In [126] wurden bereits erste definierte Manöver zur Nutzung in urbanen Szenarien dargestellt.

Der Fokus der Arbeit lag auf der Automationsfunktionalität. Daher war die Zielsetzung hinsichtlich der Mensch-Maschine-Schnittstelle die Beschreibung von Konzepten und Methoden zur Bereitstellung verschiedenster Kommunikationsmöglichkeiten, nicht die Beschreibung der konkreten Ausgestaltung der Schnittstelle. Für die fokussierte Automationsfunktionalität wurden umfangreiche positive Wirkpotentiale hinsichtlich der Vermeidung von Problemen im Zusammenwirken von Mensch und Automation und der Erreichung eines signifikanten Komfort- und Sicherheitsgewinnes aufgezeigt. Die konkrete Ausgestaltung der Mensch-Maschine-Schnittstelle hat einen erheblichen Einfluss auf die Wirkung der kooperativen Automation beim Fahrer und damit die Ausschöpfung der aufgezeigten Wirkpotentiale. Daher sollte im Anschluss an diese Arbeit die Ausgestaltung einer Mensch-Maschine-Schnittstelle erfolgen, welche diese Wirkpotentiale bestmöglich ausschöpft. Für die Gestaltung liefern die mit der kooperativen Automation evaluierten Ausgestaltungen und die damit erreichten Ergebnisse wertvolle Informationen. Für eine folgende Produktentwicklung bietet die vorliegende Arbeit sowohl die konzeptionelle als auch die technische Grundlage der Automationsfunktionalität. Im weiteren Produktentwicklungsprozess sollten Probandenstudien mit einer großen Anzahl an Probanden durchgeführt werden, um die Wirkungen der kooperativen Automation mit dieser konkreten Ausgestaltung der Mensch-Maschine-Schnittstelle abzusichern. Als Leitfaden für die weitere Vorgehensweise sollte der im Rahmen des Projektes RESPONSE 3 entwickelte europäische Code of Practice angewendet werden (siehe [112]). Hier werden unter anderem detaillierte Anforderungen an Studien zur Absicherung der Wirkungen genannt.

Neben den weiterführenden Arbeiten hinsichtlich der technischen Konkretisierung des Konzeptes, der Entwicklung von Ansätzen zur technischen Umsetzung und der Entwicklung einer optimalen Mensch-Maschine-Schnittstelle für die kooperative Automation ist eine Weiterentwicklung der gesamten kooperativen Automation oder auch einzelner ihrer Aspekte in Richtung Produktreife erstrebenswert. Um dies erreichen zu können, muss die Sicherstellung und der Nachweis der funktionalen

Sicherheit und Zuverlässigkeit der Automation erfolgen. Diese Thematik wurde in der vorliegenden Arbeit nur angerissen, da hier die grundlegende Gestaltung des Zusammenwirkens von Fahrer und Automation im Vordergrund stand. Im Folgenden werden einige in diesem Zusammenhang relevante Themenfelder aufgeführt, die in weiterführenden Arbeiten adressiert werden sollten.

Hinsichtlich der genutzten Sensorik zum Aufbau des Umfeldmodells für die kooperative Automation sollten die entwickelten Methoden für den Umgang mit Messunsicherheiten und Sensorausfällen erweitert werden. Die Zielsetzung besteht darin, dass auch bei sehr unsicheren oder fehlenden Sensorinformationen ein sicheres und möglichst zuverlässiges Verhalten der kooperativen Automation garantiert werden kann.

Des Weiteren ist die Sicherheit und Zuverlässigkeit der in dieser Arbeit beschriebenen Ansätze zur Umsetzung der kooperativen Automation selbst zu gewährleisten. Dies betrifft zum Beispiel die Umsetzungen der Manöverplanung oder der gemeinsamen Handlungsplanung. Dazu sollten einerseits weitere Sicherheitsmechanismen eingefügt werden. Andererseits sollten durch formale Methoden sowie strukturiertes und automatisiertes Testen die Sicherheit und Zuverlässigkeit nachgewiesen und Systemgrenzen aufgezeigt werden. Als eine Basis der Tests sollte ein detaillierter Szenario- und Anforderungskatalog erstellt werden, der durch die zu testenden Algorithmen abzudecken ist. Strukturierte Tests sollten als ein Bestandteil eines anzuwendenden integrierten Entwicklungs- und Testprozesses mit systematischem Anforderungsmanagement Anwendung finden. Unter Beteiligung des Autors dieser Arbeit wurde eine diesbezügliche Vorgehensweise bereits in [175] beschrieben. Nur durch die Anwendung eines derartigen Prozesses kann ein strukturiertes Erreichen verschiedener Anforderungen, zum Beispiel hinsichtlich der Sicherheit und Zuverlässigkeit, gewährleistet werden.

Da bei sämtlichen Überlegungen in dieser Arbeit stets die technische Umsetzbarkeit im Vordergrund stand, bietet das erarbeitete Konzept und seine Umsetzung nach Einschätzung des Autors einen optimalen Ausgangspunkt, um nach einer umfassenden Adressierung des Themenfeldes der Sicherheit und Zuverlässigkeit in Produkte eingehen zu können.

Ein weiterer Ansatzpunkt für weiterführende Arbeiten ist die Erweiterung der kooperativen Automation um Aspekte der Kooperation mit anderen Verkehrsteilnehmern sowie mit der Verkehrsinfrastruktur. Eine Möglichkeit für die technische Realisierung wird durch die auf der Verwendung von WLAN (Wireless Local Area Network) basierende Fahrzeug-zu-Fahrzeug (Vehicle-to-Vehicle) und Fahrzeug-zu-Infrastruktur (Vehicle-to-Infrastructure) Kommunikationstechnologie geboten. Eine besonders interessante Fragestellung ist in diesem Zusammenhang, ob sich die in dieser Arbeit entwickelten Prinzipien zur Kooperation mit dem Fahrer auch zur Kooperation mit anderen Verkehrsteilnehmern anwenden lassen, um so zum Beispiel kooperative Fahrmanöver zu realisieren.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde die kooperative Automation in einer Vielzahl von Evaluierungen und Demonstrationen eingesetzt. Dabei wurden stets positive Ergebnisse erzielt und so signifikant zum Erfolg von diversen Projekten beigetragen. Zukünftig wird die kooperative Automation auch weiterhin in verschiedensten Projekten am Institut für Verkehrssystemtechnik des DLR eingesetzt und dabei stetig weiterentwickelt. So werden auch verschiedene der in diesem Abschnitt aufgeführten offenen Punkte und Fragestellungen weiter betrachtet. Aufgrund des großen Potentials der in

dieser Arbeit formulierten Ideen bleibt es dabei wissenschaftlich äußerst interessant, welche weiteren Fortschritte in Zukunft auf dieser Basis erreicht werden können.

Anhang

A Fuzzy Logik und andere zur Manöverplanung geeignete Methoden

Im Folgenden wird zunächst die für die Manöverplanung genutzte Methode der Fuzzy Logik erläutert (Anhang A.1). Um einen Überblick über allgemein zur Manöverplanung geeignete Methoden zu geben, werden im Anschluss einige bekannte Arbeiten vorgestellt, die sich mit bei der Manöverplanung vorkommenden Aufgaben befassen (Anhang A.2).

A.1 Fuzzy Logik

Zadeh [214] formulierte im Jahr 1965 die Theorie der unscharfen Mengen. In einer unscharfen Menge kann ein Element nicht nur enthalten oder nicht enthalten sein, sondern es kann auch teilweise enthalten sein. Der Zugehörigkeitsgrad μ ($\mu \in [0, 1]$) gibt an, zu welchem Grad das Element in der Menge enthalten ist. Um die Elemente einer Grundmenge unscharfen Mengen zuzuordnen und dabei deren Zugehörigkeitsgrade festzulegen, wird für jede unscharfe Menge eine Zugehörigkeitsfunktion definiert. Diese beschreibt den Zusammenhang von Grundmenge und unscharfer Menge. Zugehörigkeitsfunktionen können zum Beispiel trapezförmig, rechteckförmig, dreieckförmig oder gaußförmig sein. Um eine durch eine Zugehörigkeitsfunktion definierte unscharfe Menge zu beschreiben, kann ein linguistischer Wert verwendet werden. Dieser erklärt sprachlich die unscharfe Menge zum Beispiel durch Begriffe wie „groß“ oder „klein“. Variablen, die linguistische Werte annehmen können, heißen linguistische Variablen. So wird es möglich, vage definierte natürlichsprachliche Begriffe für eine mathematische Modellierung zu nutzen.

Die Fuzzy Logik bietet basierend auf den unscharfen Mengen sowie den sprachlich formulierten Regeln die Möglichkeit, Schlussfolgerungen durchzuführen. Umfassende Darstellungen der Fuzzy Logik und ihrer Anwendungen bieten zum Beispiel Kruse et al. [117], Zimmermann [216] und Michels et al. [134]. Die Anwendung der Fuzzy Logik in einem System lässt sich in die vier grundlegenden Schritte Fuzzifizierung, Inferenz, Komposition und Defuzzifizierung einteilen. Diese werden im Folgenden kurz unter Verwendung eines Anwendungsbeispiels erläutert. Das Ziel des Anwendungsbeispiels ist es, unter Verwendung der Fuzzy Logik aufgrund der beiden Eingangswerte a und b den Ausgangswert c zu bestimmen. Abbildung A.1 illustriert dieses Beispiel.

Die Fuzzifizierung beschreibt die Aufgabe, aus scharfen Eingangswerten unscharfe Daten zu erzeugen. Dazu wird der Zugehörigkeitsgrad des Eingangswertes zu allen linguistischen Werten einer linguistischen Variable bestimmt. Im Anwendungsbeispiel müssen die Eingangswerte $a = 14$ und $b = 25$ fuzzifiziert werden, um die Zugehörigkeitsgrade zu den linguistischen Werten „klein“, „mittel“ und „groß“ der linguistischen Variablen a^L und b^L zu erhalten. Durch die Anwendung der

dreieckförmigen Zugehörigkeitsfunktionen ergeben sich die in Abbildung A.1 gezeigten Zugehörigkeitsgrade (für a^L : $\mu_{a,klein} = 0,23$, $\mu_{a,mittel} = 0,73$, $\mu_{a,groß} = 0$; für b^L : $\mu_{b,klein} = 0$, $\mu_{b,mittel} = 0$, $\mu_{b,groß} = 0,9$).

Die Inferenz bezeichnet das Bilden von unscharfen Schlussfolgerungen. Linguistische Regeln verknüpfen linguistische Werte zu einer logischen Aussage. Damit wird eine sprachliche Formulierung von Regeln ermöglicht, die keine exakte Modellierung mathematischer Zusammenhänge erfordert. Die Prämisse der Regel beschreibt eine bestimmte Situation der linguistischen Werte, die Konklusion gibt den linguistischen Wert an, der durch die Regel erfüllt werden kann. Die Erfüllung der Konklusion gibt an, zu welchem Grad diese erfüllt ist. Analog zur booleschen Logik können Operatoren für „UND“ und „ODER“ Verknüpfungen sowie Negationen definiert werden. Im Anwendungsbeispiel wird mittels der Regel R-1 eine Schlussfolgerung hinsichtlich c^L gebildet:

$$\text{R-1: } \underbrace{\text{WENN } a^L \text{ mittel UND } b^L \text{ groß}}_{\text{Prämisse}} \underbrace{\text{DANN } c^L \text{ mittel}}_{\text{Konklusion}}$$

Eine grafische Veranschaulichung dieser Regel zeigt Abbildung A.1. Die unscharfe Ergebnismenge dieser Regel wird beschrieben durch die Zugehörigkeitsfunktion $\mu_{c,mittel,R-1}(c)$. Die Definition der Operatoren „UND“ und „ODER“ ist gegeben durch:

Definition A.1. Fuzzy Operatoren „UND“ und „ODER“:

$$\text{UND} : \mu_{UND} = \min(\mu_a, \mu_b)$$

$$\text{ODER} : \mu_{ODER} = \max(\mu_a, \mu_b)$$

Zielt die Konklusion mehrerer linguistischer Regeln der Regelbasis auf eine linguistische Variable ab, so muss eine Komposition der einzelnen resultierenden Zugehörigkeitsfunktionen zu einer Gesamtzugehörigkeitsfunktion und damit einer unscharfen Menge erfolgen. Die Bildung dieser Gesamtzugehörigkeitsfunktion erfolgt zum Beispiel durch Nutzung einer Maximumfunktion. Im Anwendungsbeispiel besteht die Regelbasis aus den drei Regeln R-1, R-2 und R-3. Durch die Konklusionen dieser Regeln ergeben sich die drei Zugehörigkeitsfunktionen $\mu_{c,mittel,R-1}(c)$, $\mu_{c,mittel,R-2}(c)$ und $\mu_{c,groß,R-3}(c)$. Aus diesen erfolgt durch die Maximumbildung die in Abbildung A.1 gezeigte Gesamtzugehörigkeitsfunktion $\mu_{c,res}(c)$, welche die unscharfe Ergebnismenge der gesamten Regelbasis darstellt.

Um die unscharfe Ergebnismenge wieder in einen scharfen Wert zu überführen, muss eine Defuzzifizierung vorgenommen werden. Eine Möglichkeit dazu ist die Schwerpunktmethode. Hier wird der Flächenschwerpunkt der unscharfen Menge bestimmt. Die Abszisse des ermittelten Flächenschwerpunktes bildet den scharfen Wert. Im in Abbildung A.1 gezeigten Anwendungsbeispiel ergibt sich durch Ermittlung des Flächenschwerpunktes für die durch die Zugehörigkeitsfunktion $\mu_{c,res}(c)$ definierte unscharfe Ergebnismenge der scharfe Ausgangswert $c = 18,6$.

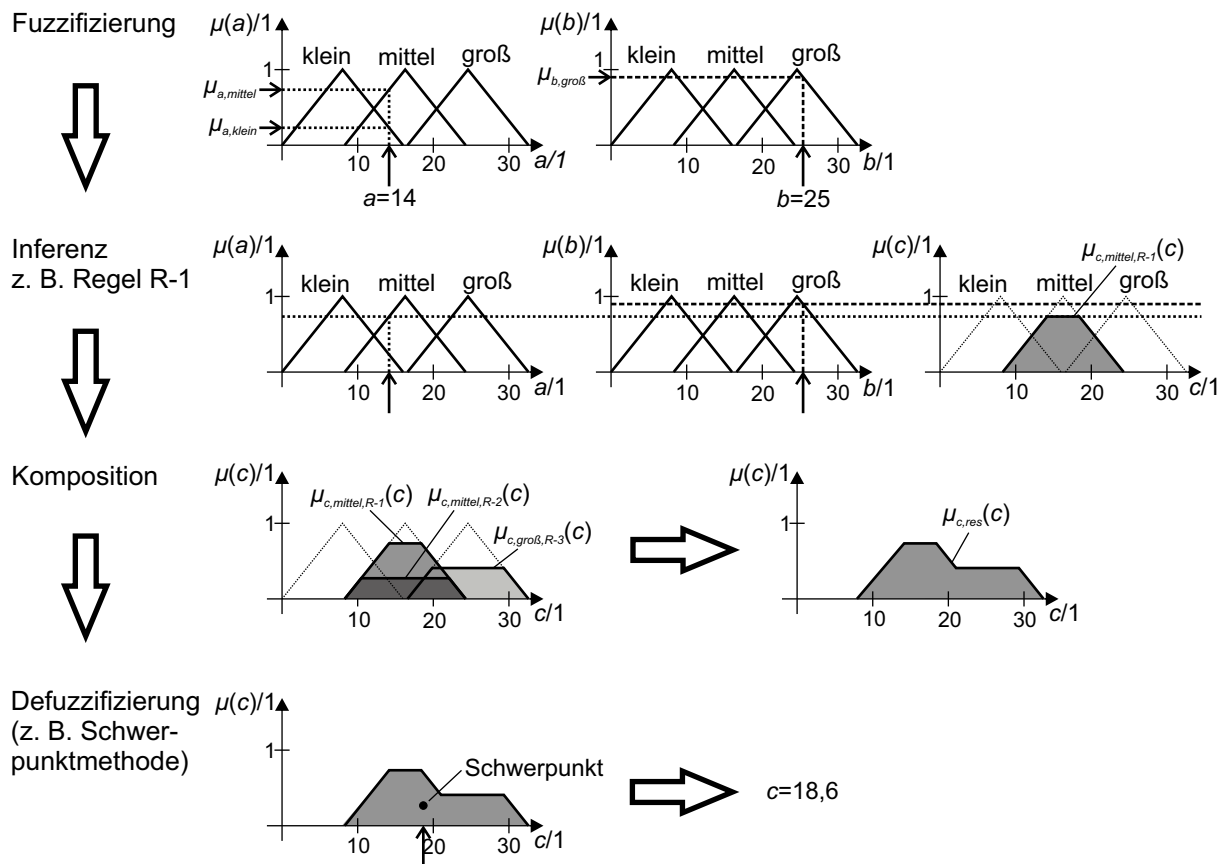


Abbildung A.1: Anwendungsbeispiel der Fuzzy Logik

A.2 Übersicht zur Manöverplanung geeigneter Methoden

Neben der Fuzzy Logik eignen sich grundsätzlich auch andere Methoden zur Erfüllung der bei der Manöverplanung vorkommenden Aufgaben. Diese Aufgaben sind im Einzelnen die Erkennung von Fahrmanövern und die Entscheidung zwischen verschiedenen Verhaltensweisen oder Manövern, was die Bestimmung durchführbarer Verhaltensweisen und die Auswahl einer Verhaltensweise aus dieser Menge umfasst. Im Weiteren werden einige diese Aufgaben adressierende bekannte Arbeiten kurz vorgestellt, um einen Überblick über mögliche Methoden zur Manöverplanung zu geben. Für die Begründung der Auswahl der Fuzzy Logik im Rahmen dieser Arbeit siehe Kapitel 6.1.1.

Für die Erkennung des aktuell vom Fahrzeug gefahrenen Manövers nutzt Gerdes [78] ein Bayes'sches Netz. Bayes'sche Netze bieten als ein probabilistisches Verfahren eine gute Möglichkeit, mit unsicheren Sensordaten umzugehen. Die Methode der Fuzzy Logik liegt dem Ansatz von Nigro et al. [153] zur Manövererkennung zugrunde. Die Fuzzy Regeln bilden in dieser Arbeit Bedingungen, um einen Zustandsautomaten zu schalten. Stählin [191] nutzt einen Zustandsautomaten, der ausschließlich mit boolescher Logik arbeitet. Verschiedene Arbeiten beschäftigen sich mit der Prädiktion von Fahrmanövern, das heißt der Erkennung eines Manövers, bevor die Ausführung außerhalb des Fahrzeuges deutlich ersichtlich wird. Blaschke et al. [25] nutzen dazu ein auf psychologischen Handlungsmodellen basierendes Fuzzy Logik Regelwerk, dessen Konklusionen direkt die Manöver „Straße folgen“ und „Überholen“ differenzieren. Die bisher betrachteten Arbeiten benö-

tigen als Eingangsgrößen Daten der Umfeldsensorik und des Eigenfahrzeuges. Die Arbeiten von Oliver und Pentland [158] und Lethaus und Rataj [123] nutzen zusätzlich Blickbewegungsdaten, um Manöver mittels „Hidden Markov Models“ zu präzisieren. Ein „Hidden Markov Model“ ist ebenso wie ein Bayes'sches Netz ein probabilistisches Verfahren.

Die Entscheidung zwischen verschiedenen Verhaltensweisen ist eine im Bereich des automatischen Fahrens und im Bereich der Fahrermodellierung vorkommende Aufgabe. Der Bereich der Fahrermodellierung ist auch aufgrund der Kompatibilitätsforderung der Manöverplanung für die kooperative Automation von Interesse. Zur Verhaltensentscheidung für das automatische Fahren werden häufig Zustandsautomaten eingesetzt (zum Beispiel [109, 131, 138], siehe Kapitel 2.2.2). Pellkofer [163] (siehe auch Kapitel 2.2.2) nutzt die Methode der Fuzzy Logik. Schubert et al. [184] nutzen für Manöverentscheidungen Bayes'sche Netze. Schneider [179] nutzt zur Modellierung von Fahrsituationen und Fahrmanövern für Fahrerassistenzsysteme einen Ansatz, in dem er die Fuzzy Logik und ein Bayes'sches Netz kombiniert, um sowohl Unschärfe als auch Unsicherheit modellieren zu können. Im Bereich der Fahrermodellierung wird von Irmscher [103] die Methode der Fuzzy Logik eingesetzt. Rekersbrink [170] baut basierend auf der Fuzzy Logik eine Verkehrsflusssimulation auf. Garrel et al. [73] entwickeln ein Modell des individuellen Fahrverhaltens eines Fahrers basierend auf einem neuronalen Netz.

B Übersicht der für die Evaluierungen eingesetzten Versuchsplattformen und der Projektbezüge

Wie bereits in Kapitel 8.1.4 aufgezeigt wurde, erfolgten im Rahmen des iterativen Entwicklungsprozesses 54 Evaluierungen und 21 öffentliche Demonstrationen mit der kooperativen Automation. Für die Durchführung der Evaluierungen und Demonstrationen wurden verschiedene Fahrsimulatoren und Versuchsfahrzeuge als Versuchsplattformen verwendet. In Anhang B.1 werden diese Versuchsplattformen vorgestellt. Zusätzlich zu dem durch diese Arbeit gegebenen Projektbezug erfolgten die einzelnen Evaluierungen und Demonstrationen im Rahmen von weiteren Projekten. Anhang B.2 stellt diese Projekte kurz dar. Die bereits in Kapitel 8.1.4 präsentierte Tabelle 8.1 (Seite 160) gibt eine Übersicht sämtlicher Evaluierungen sowie Demonstrationen und zeigt dabei sowohl die verwendeten Versuchsplattformen als auch die Projektbezüge auf.

B.1 Eingesetzte Versuchsplattformen

Die Implementierung der kooperativen Automation basiert auf der am Institut für Verkehrssystemtechnik des DLR entstandenen Entwicklungs- und Laufzeitumgebung DOMINION (siehe [72]). DOMINION gewährleistet unter anderem den Betrieb prototypischer Systemimplementierungen in sämtlichen Versuchsplattformen des Institutes. Daher kann die Implementierung der kooperativen Automation in jeder dieser Versuchsplattformen betrieben werden. Im Folgenden werden diejenigen Versuchsplattformen beschrieben, in denen die kooperative Automation zum Einsatz kam (siehe dazu Tabelle 8.1). Diese umfassen eine Software in the Loop Simulation, Fahrsimulatoren (IDeELab, HMI-Lab, VR-Labor, dynamischer Fahrsimulator und MoSAIC-Labor) und Versuchsfahrzeuge (FASCar I, FASCar II und FASCarE).

Die eingesetzte Software in the Loop Simulation bietet die Möglichkeit, die kooperative Automation unter Nutzung eines Computers zu evaluieren. Die Simulation bietet dazu Fahrdynamikmodelle, Modelle der Umgebung, eine Verkehrssimulation mit Szenariosteuerung und eine Visualisierung. Der Festsitzsimulator des IDeELab (**I**nteraction **D**esign and **E**rgonomics **L**aboratory, siehe Abbildung B.1) besteht neben einer Projektionsfläche zur Darstellung der Fahrszenen aus einer Sitzkiste, die über ein aktives Lenkrad, einen aktiven Sidestick, ein aktives Gaspedal sowie ein aktives Bremspedal verfügt. „Aktiv“ bedeutet hier, dass mittels am Stellteil verbauter Aktoren haptische Rückmeldungen erzeugt werden können, die für die Gestaltung einer haptischen Kommunikation von kooperativer Automation und Fahrer verwendbar sind. Darüber hinaus ist die Sitzkiste mit verschiedenen Displays ausgestattet, welche zum Beispiel die Realisierung einer visuellen Kommunikation der kooperativen Automation mit dem Fahrer ermöglichen. Weitere Festsitzsimulatoren sind das HMI-Lab (**H**uman-**M**achine-**I**nterface-**L**abor) und das VR-Labor (**V**irtual-**R**eality-**L**abor). Diese verfügen ebenfalls über verschiedene Displays, ein aktives Lenkrad, ein aktives Gaspedal sowie

ein aktives Bremspedal. Sie unterscheiden sich vom IDeELab durch den höheren Immersionsgrad, der zum Beispiel durch größere Projektionsflächen erreicht wird.

Die Besonderheit des MoSAIC-Labors (**M**odular and **S**calable **A**pplication Platform for Testing and Evaluating **ITS** Components) besteht in der Möglichkeit, einen Versuch durchzuführen, bei dem bis zu drei Probanden gleichzeitig in einer Simulation fahren. Dazu verfügt das Labor über drei Festsitzsimulatoren, die jeweils mit eigenen Displays zur Darstellung der Simulation und visueller Rückmeldungen an den Fahrer ausgestattet sind. Darüber hinaus bieten die einzelnen Festsitzsimulatoren ein aktives Lenkrad, ein aktives Gaspedal sowie ein aktives Bremspedal.

Der dynamische Fahrsimulator des Institutes (siehe Abbildung B.2) verfügt über ein Hexapod-Bewegungssystem, das eine realitätsnahe Umsetzung der Fahrzeugbeschleunigungen ermöglicht. In der Kabine des Fahrsimulators befindet sich ein reales Fahrzeug. Ein Rückprojektions-Visualisierungssystem bietet dem Fahrer sowohl nach vorn als auch zu den Seiten ein weites Blickfeld. Die Seitenspiegel, der Rückspiegel und das Kombiinstrument sind mittels Displays realisiert. Zudem bietet der dynamische Fahrsimulator ein aktives Lenkrad, ein aktives Gaspedal sowie ein aktives Bremspedal.



Abbildung B.1: Festsitzsimulator des IDeELab



Abbildung B.2: Dynamischer Fahrsimulator

Die Versuchsfahrzeuge FASCar I, FASCar II (siehe Abbildungen B.3 und B.4) und FASCarE dienen der Erprobung verschiedenster Assistenz- und Automationsfunktionen. Zur Umfelderkennung sind die Fahrzeuge unter anderem mit Laserscannern, Radarsensoren und Kameras ausgestattet. Zur hochgenauen Ortung finden Ortungssysteme Verwendung, die einen Differential Global Positioning System Empfänger mit einer Trägheitsplattform integrieren. Die verbaute Aktorik erlaubt es Assistenz- und Automationsfunktionen, in vollem Umfang sowohl in die Längs- als auch in die Querverführung der Fahrzeuge einzugreifen und diese so zum Beispiel vollständig zu übernehmen. Als Mensch-Maschine-Schnittstelle für den Fahrer können ein Display anstelle des konventionellen Kombiinstrumentes, ein aktives Lenkrad und ein aktives Gaspedal verwendet werden. Die Besonderheit des FASCar II ist ein Steer-by-Wire-Lenksystem, das eine vom Lenkrad unabhängige Ansteuerung der Fahrzeuglenkung durch Assistenz- und Automationsfunktionen ermöglicht (siehe [180]). Dadurch kann das aktive Lenkrad gezielt als Mensch-Maschine-Schnittstelle ohne eine gleichzeitige Beeinflussung der Fahrzeuglenkung eingesetzt werden.



Abbildung B.3: FASCar I



Abbildung B.4: FASCar II

B.2 Projektbezüge der Evaluierungen

Im Folgenden wird eine Übersicht der Projekte gegeben, in deren Rahmen die einzelnen Evaluierungen erfolgten (siehe dazu Tabelle 8.1, Seite 160). Es wird dabei auch auf die adressierten Szenarien eingegangen.

Im Projekt „Mobilität ohne Grenzen - komfortabel, sicher und effizient reisen“ (gefördert vom Niedersächsischen Ministerium für Wirtschaft, Technologie und Verkehr) wurde die kooperative Automation zur Realisierung eines vollautomatischen Szenarios im FASCar I und FASCar II genutzt. Die vollautomatische Fahrt umfasste die Reaktion auf eine Ampel mittels Fahrzeug-zu-Infrastruktur Kommunikation, die Beachtung eines quer auf der Fahrbahn stehenden Fahrzeuges sowie die Kommunikation mit Nutzern außerhalb des Fahrzeuges mittels Smartphone (siehe [127]). Das Szenario wurde erfolgreich in drei technischen Evaluierungen getestet und bei zwei öffentlichen Demonstrationen auf dem DLR Standort Braunschweig vorgestellt.

Im DLR internen Projekt „Assistenz für Verkehrsteilnehmer“ wurde mittels der kooperativen Automation in verschiedenen Autobahnszenarien und autobahnähnlichen Szenarien teilautomatisiertes Fahren unter Nutzung diverser Kontrollverteilungen realisiert. Es wurden vier erfolgreiche technische Evaluierungen und zwei Usability Untersuchungen mit Probanden unter Nutzung von Fahr simulatoren und dem Versuchsfahrzeug FASCar II durchgeführt (siehe zum Beispiel Kapitel 8.3.3 und [33]).

Im Rahmen des DLR internen Projektes „Fahrzeugintelligenz und mechatronisches Fahrwerk“ (FiF) wurden mit der kooperativen Automation in den drei Teilprojekten Valet Parking, MobiFAS und urbanDRIVE verschiedene Szenarien umgesetzt und evaluiert. Die Teilprojekte Valet Parking und MobiFAS waren zusätzlich dem DLR internen Portfoliothema „verkehrssystemische Elektromobilitätsforschung“ (VeEl) zugeordnet.

Im FiF Teilprojekt Valet Parking wurde mit Hilfe der kooperativen Automation ein vollautomatisches Valet Parking Szenario realisiert (siehe [126]). In diesem Szenario konnte der Fahrer an einer Abgabeposition auf einem großen Parkplatz (zum Beispiel am Bahnhof oder Flughafen) sein Fahrzeug verlassen und daraufhin einen vollautomatischen Parkvorgang veranlassen. Das Fahrzeug fuhr selbstständig zu einem freien Stellplatz und parkte dort ein. Benötigte der Fahrer sein Fahrzeug zurück, konnte er einen vollautomatischen Bereitstellungsvorgang veranlassen. Das Fahrzeug fuhr dann von seinem Stellplatz zu einer Bereitstellungsposition und wartete dort auf den Fahrer. Dieser konnte anschließend direkt einsteigen und eine manuelle Fahrt beginnen. Für die Veranlassung des Parkvorgangs und des Bereitstellungsvorgangs wurde ein Smartphone verwendet, das

über das Internet mit der kooperativen Automation verbunden war. Das vollautomatische Valet Parking Szenario wurde in sieben technischen Evaluierungen in drei Versuchsfahrzeugen erfolgreich getestet. Des Weiteren wurde das Szenario der Öffentlichkeit erfolgreich auf vier verschiedenen Parkplätzen mit dem Versuchsfahrzeug FASCar I sowie auf zwei weiteren Parkplätzen mit dem Versuchsfahrzeug FASCarE demonstriert. Einer dieser Parkplätze war ein öffentlicher Parkplatz am Hauptbahnhof Braunschweig.

Das FiF Teilprojekt MobiFAS (**Mobilgeräte und Fahrerassistenzsysteme**) adressierte die Integration von Mobilgeräten in die kooperative Automation für das hochautomatisierte Fahren auf der Autobahn (siehe [119, 120, 121]). Während der hochautomatisierten Fahrt konnte der Fahrer seine Aufmerksamkeit auf das in die Automation integrierte Mobilgerät richten, um zum Beispiel zu lesen. Im Fokus des Teilprojektes stand die Gestaltung der Kontrollübernahme durch den Fahrer bei Annäherung des Fahrzeuges an eine Situation, die eine Kontrollübernahme erforderlich machte (zum Beispiel eine Baustellendurchfahrt). Zusätzlich zu visuellen und auditiven Informationen, die in diesem Fall von fest im Fahrzeug verbauten Vorrichtungen ausgesendet wurden, wurde der Fahrer durch verschiedene visuelle Elemente auf dem Display des Mobilgeräts zur Kontrollübernahme aufgefordert. Bei einer im Fahrsimulator des VR-Labors durchgeführten Untersuchung mit Probanden wurden gute Ergebnisse für diese Gestaltung der Kontrollübernahme erzielt. Darüber hinaus wurde das System unter Nutzung von zwei Fahrsimulatoren wiederholt erfolgreich öffentlich demonstriert.

Das FiF Teilprojekt urbanDRIVE adressiert automatisiertes Fahren im Stadtverkehr. In der ersten Ausbaustufe urbanDRIVE 1.0 wurde mit der kooperativen Automation eine automatisierte Längsführung in der Stadt umgesetzt (siehe [18]). Dabei wurden vielfältige Teilszenarien berücksichtigt, so dass die Bewältigung eines längeren innerstädtischen Abschnitts ermöglicht wurde. Die Teilszenarien umfassten zum Beispiel das Befahren von innerstädtischen Straßenzügen und Kreuzungen, die Reaktion auf andere Fahrzeuge im eigenen Fahrstreifen sowie das Annähern an Lichtsignalanlagen unter Berücksichtigung der Phasen. Die Phasendaten wurden der kooperativen Automation mittels Fahrzeug-zu-Infrastruktur Kommunikation von der Lichtsignalanlage übermittelt. Das System wurde mit dem Versuchsfahrzeug FASCarE erfolgreich evaluiert und öffentlich demonstriert. Eine Evaluierung und eine Demonstration fanden im öffentlichen Verkehr auf der AIM (**Anwendungsplattform intelligente Mobilität**) Referenzstrecke auf dem Braunschweiger Stadtring statt.

Das von der Europäischen Union (EU) geförderte Projekt CityMobil befasste sich mit automatisierten Transportsystemen in urbaner Umgebung. Die kooperative Automation wurde in CityMobil im Rahmen eines Konzeptes verwendet, das mit besonderer Infrastruktur ausgestattete Fahrstreifen vorsieht, die entsprechend ausgestatteten Fahrzeugen hochautomatisiertes Fahren ermöglichen. Ein besonderer Fokus lag auf den Transitionen zwischen manuellem und hochautomatisiertem Fahren am Beginn und Ende dieser Fahrstreifen. Das System wurde mit dem Versuchsfahrzeug FASCar I erfolgreich mit Probanden evaluiert (siehe [176, 196]).

Im Rahmen der von der DFG (Deutsche Forschungsgemeinschaft) geförderten Projekte H-Mode I & II (siehe zum Beispiel [42, 67]) wurde die kooperative Automation in verschiedenen Szenarien eingesetzt (siehe zum Beispiel [128, 129]). Innerhalb dieser Projekte diente das Zusammenwirken eines Reiters oder Kutschers mit seinem Reit- oder Kutschpferd (Horse) als Vorbild der Gestaltung

des kooperativen Zusammenwirkens von Fahrer und Automation (weitere Information siehe auch Kapitel 2.1). Die Interaktionsumsetzung basierte hier hauptsächlich auf der Nutzung von Haptik. Es wurde teilautomatisiertes Fahren mit zwei Kontrollverteilungen realisiert. Bei einer Kontrollverteilung lag die Kontrolle hauptsächlich bei dem Fahrer, bei der anderen Kontrollverteilung hauptsächlich bei der Automation. Die adressierten Szenarien umfassten Fahren auf der Autobahn, unter anderem mit Fahrstreifenwechsel- und Notsituationen (siehe Kapitel 8.3.1), kreuzungsfreie Landstraßen sowie Weggabelungen. Im Rahmen der Projekte wurden mit der kooperativen Automation innerhalb dieser Szenarien mehrere erfolgreiche Probandenstudien in Fahrsimulatoren durchgeführt.

Im von der EU geförderten Projekt HAVEit (**H**ighly **A**utomated **V**ehicles for **I**ntelligent **T**ransportation) wurden in verschiedenen Teilprojekten Systeme zum teil- und hochautomatisierten Fahren aufgebaut [95, 96] (siehe auch Kapitel 2.2.3). Die kooperative Automation wurde im Rahmen von HAVEit für die Entwicklung des „Joint Systems“ genutzt (siehe [68]). Das „Joint System“ erlaubt hochautomatisiertes Fahren auf der Autobahn mit einem breiten Manöverspektrum in verschiedenen Teilszenarien. Es bietet dabei dem Fahrer während der Fahrt die Möglichkeit, zwischen drei verschiedenen Kontrollverteilungen auszuwählen. Die Kontrollverteilungen sind die Stufen „Assistiert“, „ACC“ und „Hochautomatisiert“. In der Stufe „Assistiert“ werden dem Fahrer Informationen dargestellt, in der Stufe „ACC“ wird die Längsführung durch die Automation übernommen, in der Stufe „Hochautomatisiert“ erfolgt die Übernahme der Längs- und Querführung. Es wurden mit dem System in Fahrsimulatoren mehrere erfolgreiche Probandenstudien durchgeführt (siehe zum Beispiel Kapitel 8.3.2), bei denen die vollständige kooperative Automation zum Einsatz kam. Die Umsetzung in FASCar I und II erfolgte gemeinsam mit Projektpartnern, wobei von der kooperativen Automation ausschließlich die Bearbeitungsebene Manöverplanung verwendet wurde. Bei der Projektabschlussveranstaltung konnte die Umsetzung im FASCar II erfolgreich demonstriert werden.

Im Rahmen der vom Niedersächsischen Ministerium für Wissenschaft und Kultur geförderten Projekte IMoST I & II (**I**ntegrated **M**odelling for **S**afe **T**ransportation) wurde die kooperative Automation für das hochautomatisierte Fahren auf der Autobahn eingesetzt. Das übergeordnete Ziel der Projekte war die Entwicklung von Fahrermodellen, die eine simulative Evaluierung von Assistenz- und Automationssystemen ermöglichen [17]. Die kooperative Automation wurde im Rahmen von IMoST erfolgreich in verschiedenen Studien genutzt und auf den Projektabschlussveranstaltungen erfolgreich demonstriert. IMoST I fokussierte auf das Einfädeln auf eine Autobahn (siehe [178]). In IMoST II ermöglichte die kooperative Automation hochautomatisiertes Fahren auf der Autobahn im Allgemeinen. Für die Interaktionsumsetzung wurde ein Head-Up-Display stark genutzt. Außerdem bot sich dem Fahrer während der Fahrt die Möglichkeit, zwischen verschiedenen Kontrollverteilungen auszuwählen.

Im Projekt interactIVe (accident avoidance by active intervention for Intelligent Vehicles, gefördert von der EU) lag das Hauptaugenmerk der Anwendung der kooperativen Automation auf einem Szenario, das die Vermeidung von Unfällen durch Notausweichen adressierte. Das Notausweichmanöver wurde dabei von der kooperativen Automation mit einem Kontrollanteil von 100 % ausgeführt. Dazu wurden erfolgreich Probandenstudien im Simulator und im Versuchsfahrzeug FASCar II durchgeführt (siehe [85]). Die in interactIVe verwendete Funktionalität beschränkte sich nicht nur

auf das Notausweichmanöver, sondern es war auch allgemeines hochautomatisiertes Fahren auf der Autobahn möglich, wobei der Fahrer die Möglichkeit hatte, zwischen verschiedenen Kontrollverteilungen auszuwählen. Auf der Projektabschlussveranstaltung erfolgte eine erfolgreiche Demonstration im Simulator.

Im Projekt D3CoS (**D**esigning **D**ynamic **D**istributed **C**ooperative Human Machine Systems, gefördert von der EU) wurde ein erster Schritt zur Erweiterung der kooperativen Automation zur Kooperation mit anderen Fahrzeugen unternommen. Das Szenario umfasste die Kooperation zwischen zwei Fahrzeugen mit dem Ziel der Realisierung eines kooperativen Fahrstreifenwechselmanövers. Nach der diesbezüglichen Anfrage mittels Fahrzeug-zu-Fahrzeug Kommunikation, öffnet dabei ein Fahrzeug eine Lücke zur Durchführung des Fahrstreifenwechsels für das andere Fahrzeug. Die kooperative Automation ermöglichte dieses Szenario sowohl für das manuelle Fahren als auch für das hochautomatisierte Fahren (in [193] finden sich Informationen zur Gestaltung der Interaktionsumsetzung). Unter anderem auf der Projektabschlussveranstaltung erfolgten erfolgreiche Demonstrationen im Fahrsimulator. Mit den Arbeiten in D3CoS wurde somit bereits begonnen, die im Ausblick dieser Arbeit (siehe Kapitel 9.2) angesprochene Erweiterung der kooperativen Automation hinsichtlich der Kooperation mit anderen Verkehrsteilnehmern umzusetzen.

Im Projekt AdaptIVe (**A**utomated **D**riving **A**pplications and **T**echnologies for **I**ntelligent **V**ehicles, gefördert von der EU) wurde mit der kooperativen Automation teil- und hochautomatisiertes Fahren sowohl in einem innerstädtischen Szenario als auch in einem Autobahnszenario realisiert. Der Fokus des Projektes lag auf der Gestaltung der Interaktion mit dem Fahrer mittels eines LED-Bandes im Fahrzeuginnenraum, welches den Fahrer vollständig umgibt. Es wurden dazu drei Untersuchungen mit Probanden durchgeführt, die insgesamt positive Ergebnisse lieferten (für weitere Information zur Gestaltung der Interaktion und zu den Studienergebnissen siehe [50, 51, 52]). Zwei Untersuchungen erfolgten in einem Fahrsimulator, eine Untersuchung erfolgte im Versuchsfahrzeug FASCar II.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die kooperative Automation in einer großen Bandbreite von Szenarien in verschiedenen Versuchsplattformen erfolgreich evaluiert wurde. Diese Evaluierungen erfolgten im Rahmen von 12 Projekten, zu deren erfolgreichen Abschlüssen die kooperative Automation einen wertvollen Beitrag leistete. Wie Tabelle 8.1 (Seite 160) zeigt, wurden insgesamt 37 technische Evaluierungen, 17 Usability Untersuchungen mit Probanden und 21 öffentliche Demonstrationen erfolgreich durchgeführt.

C Übersicht der in den einzelnen Abschnitten adressierten Kooperation ausmachenden Elemente

	Kooperation ausmachende Elemente								
	Kompatibilität	Gem. Weiterentwicklung der Ziele u. Werte	Gem. Aufbau des Situationsbewusstseins	Gemeinsame Handlungsplanung	Gemeinsame Handlungsausführung	Mentale Modelle	Kommunikation	Rolle und Entscheidungsspielraum	Zustandsüberwachung
Kapitel 3 Konzept der kooperativen Automation zur teil- und hochautomatisierten Fahrzeugführung									
Kapitel 3.1 Definition									
Kapitel 3.2 Kooperation ausmachende Elemente	×	×	×	×	×	×	×	×	×
Kapitel 3.3 Abstrakte Bewertung des Potentials des Konzeptes	×	×	×	×	×	×	×	×	×
Kapitel 4 Technische Konkretisierung der kooperativen Automation									
Kapitel 4.1 Das Valentalkonzept für die gemeinsame Handlungsplanung	×			×			×		
Kapitel 4.2 Entwurf einer funktionalen Systemarchitektur für die kooperative Automation	×		×	×	×		×		
Kapitel 4.3 Repräsentationen des Automationsverhaltens für die Kooperation mit dem Fahrer				×	×		×		
Kapitel 4.4 Entwicklung kompatibler Ziele, Werte und Methoden für die kooperative Automation	×								

	Kooperation ausmachende Elemente								
	Kompatibilität	Gem. Weiterentwicklung der Ziele u. Werte	Gem. Aufbau des Situationsbewusstseins	Gemeinsame Handlungsplanung	Gemeinsame Handlungsausführung	Mentale Modelle	Kommunikation	Rolle und Entscheidungsspielraum	Zustandsüberwachung
Kapitel 5 Manöverbasierte Umsetzung der kooperativen Automation									
Kapitel 5.1 Objektorientierte Modellierung der Manöver	×			×	×		×	×	
Kapitel 5.2 Einbettung der Manöver in den weiteren objektorientierten Softwareentwurf	×		×	×	×				
Kapitel 5.3 Softwareablauf der manöverbasierten Umsetzung der kooperativen Automation	×		×	×	×		×	×	
Kapitel 6 Umsetzung der Bearbeitungsebene Manöverplanung der kooperativen Automation									
Kapitel 6.1 Aufbau des Manöverbaumes	×			×					
Kapitel 6.2 Berücksichtigung des Entscheidungsspielraumes								×	
Kapitel 6.3 Ermöglichung der gemeinsamen Manöverplanung mittels impliziter Kommunikation				×	×		×		
Kapitel 6.4 Ermöglichung der gemeinsamen Manöverplanung mittels expliziter Kommunikation				×			×		
Kapitel 7 Modellierung des Manövers „Fahrstreifen wechseln“									
Kapitel 7.1 Definition des Manövers	×								
Kapitel 7.2 Elemente der Modellierung des Manövers auf der Bearbeitungsebene Manöverplanung	×								

	Kooperation ausmachende Elemente								
	Kompatibilität	Gem. Weiterentwicklung der Ziele u. Werte	Gem. Aufbau des Situationsbewusstseins	Gemeinsame Handlungsplanung	Gemeinsame Handlungsausführung	Mentale Modelle	Kommunikation	Rolle und Entscheidungsspielraum	Zustandsüberwachung
Kapitel 7.3 Umsetzung der Fähigkeiten zur Manöverplanung mittels Fuzzy Logik	×			×	×				
Kapitel 7.4 Anforderungen an einen Trajektorienplanungsalgorithmus	×			×	×				
Kapitel 8 Entwicklungsprozess und Evaluierungen der kooperativen Automation									
Kapitel 8.1 Entwicklungsprozess und Gesamtübersicht der durchgeführten Evaluierungen	×			×	×	×	×	×	
Kapitel 8.2 Ergebnisse einer ausgewählten technischen Evaluierung				×	×			×	
Kapitel 8.3 Ergebnisse aus Usability Untersuchungen mit Probanden	×			×	×	×	×	×	

Tabelle C.1: Übersicht der in den einzelnen Abschnitten der Arbeit adressierten Kooperation ausmachenden Elemente

Literaturverzeichnis

- [1] *INVENT „erfahren“ – mobil mit 8 Sinnen: INVENT Ergebnisbericht.* 2005
- [2] *Der Duden in zwölf Bänden. Bd. 5: Duden - Das Fremdwörterbuch.* 10. Mannheim [u.a.] : Bibliographisches Institut, 2010
- [3] *Duden - Deutsches Universalwörterbuch.* 7. Mannheim [u.a.] : Bibliographisches Institut, 2011
- [4] AGUILERA, V.; GLASER, S.; ARNIM, A. v.: An advanced driver speed assistance in curves: risk function, cooperation modes, system architecture and experimental validation. In: IEEE (Hrsg.): *Proceedings of IEEE Intelligent Vehicles Symposium.* Las Vegas, Nevada, 2005, S. 807–812
- [5] AHMED, K. I.: *Modeling Drivers' Acceleration and Lane Changing Behavior.* Cambridge, MA, Massachusetts Institute of Technology, Dissertation, 02.1999
- [6] ALLEN, T. M.; LUNENFELD, H.; ALEXANDER, G. J.: Driver information needs. In: HIGHWAY RESEARCH BOARD (Hrsg.): *HS-011* 999 Bd. 366. 1971, S. 102–115
- [7] ALTHOFF, M.; STURSBERG, O.; BUSS, M.: Sicherheitsbewertung von Fahrstrategien kognitiver Automobile. In: *at - Automatisierungstechnik* 56 (2008), Nr. 12, S. 653–661
- [8] AMDITIS, A.; BERTOLAZZI, E.; BIMPAS, M.; BIRAL, F.; BOSETTI, P.; DA LIO, M.; DANIELSSON, L.; GALLIONE, A.; LIND, H.; SAROLDI, A.; SJÖGREN, A.: A Holistic Approach to the Integration of Safety Applications: The INSAFES Subproject Within the European Framework Programme 6 Integrating Project PReVENT. In: *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 11 (2010), Nr. 3, S. 554–566
- [9] AMDITIS, A.; FLOUDAS, N.; KAISER-DIECKHOFF, U.; HACKBARTH, T.; B. VAN DEN BROEK; MIGLIETTA, M.; DANIELSSON, L.; GEMOU, M.; BEKIARIS, E.: Integrated vehicle's lateral safety: the LATERAL SAFE experience. In: *IET Intelligent Transport Systems* 2 (2008), Nr. 1, S. 15–26
- [10] AMELING, C.: *Fortschritt-Berichte VDI Reihe 12. Bd. 510: Steigerung der aktiven Sicherheit von Kraftfahrzeugen durch ein Kollisionsvermeidungssystem.* Düsseldorf : VDI Verlag GmbH, 2002
- [11] ARENS, M.; NAGEL, H.-H.: Representation of Behavioral Knowledge for Planning and Plan-Recognition in a Cognitive Vision System. In: JARKE, M. (Hrsg.); KOEHLER, J. (Hrsg.); LAKEMEYER, G. (Hrsg.): *Proceedings of the 25th German Conference on Artificial Intelligence.* Berlin : Springer, 2002, S. 268–282

- [12] BAINBRIDGE, L.: Ironies of Automation. In: *AUTOMATICA* 19 (1983), Nr. 6, S. 775–779
- [13] BARTELS, A.; STEINMEYER, S.; BROSIG, S.; SPICHALSKY, C.: Fahrstreifenwechselassistentz. In: WINNER, H. (Hrsg.); HAKULI, S. (Hrsg.); WOLF, G. (Hrsg.): *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*. Wiesbaden : Vieweg + Teubner, 2009, S. 562–571
- [14] BARTELS, A.; STEINMEYER, S.; WEISS, K.; MAREK, M.: Intelligent Car – Teilautomatisches Fahren auf der Autobahn. In: GESAMTZENTRUM FÜR VERKEHR BRAUNSCHWEIG E.V. (Hrsg.): *AAET 2009 - Automatisierungssysteme, Assistenzsysteme und eingebettete Systeme für Transportmittel*. Braunschweig : GZVB, 2009, S. 8–26
- [15] BARTELS, A.; TO, T.-B.; KARRENBURG, S.; WEISER, A.: Hochautomatisches Fahren auf der Autobahn. In: *Automobiltechnische Zeitschrift* 113 (2011), Nr. 09, S. 652–657
- [16] BAUER, O.; MAYR, R.; WILL, P.: Fahrerassistenzsystem warnt vor engen Kurven. In: VDI-GESELLSCHAFT FAHRZEUG- UND VERKEHRSTECHNIK (Hrsg.); VDI/VDE-GESELLSCHAFT MESS- UND AUTOMATISIERUNGSTECHNIK (Hrsg.): *Steuerung und Regelung von Fahrzeugen und Motoren - AUTOREG*. Düsseldorf : VDI Verlag GmbH, 2006 (VDI-Berichte), S. 369–378
- [17] BAUMANN, M.; COLONIUS, H.; HUNGAR, H.; KÖSTER, F.; LANGNER, M.; LÜDTKE, A.; MÖBUS, C.; PEINKE, J.; PUCH, S.; SCHIESSL, C.; STEENKEN, R.; WEBER, L.: Integrated Modeling for Safe Transportation – Driver modeling and driver experiments. In: JÜRGENSOHN, T. (Hrsg.); KOLREP, H. (Hrsg.): *Fahrermodellierung in Wissenschaft und Wirtschaft* Bd. 28. Düsseldorf : VDI Verlag GmbH, 2009 (Fortschritt-Berichte VDI Reihe 22)
- [18] BELZ, J.; BURMEISTER, A.; KASCHWICH, C.; LÖPER, C.; SCHIEBEN, A. M.; TEMME, G.; THOMASIDIS, G.; HESSE, T.: Kooperative Automation zur Längsführung im urbanen Straßenverkehr. In: UNIVERSITÄT MAGDEBURG (Hrsg.): *13. Magdeburger Maschinenbau - Tage*, 2017
- [19] BENDER, E.; DARMS, M.; SCHORN, M.; STÄHLIN, U.; ISERMANN, R.; WINNER, H.; LANDAU, K.: Antikollisionssystem Proreta - Der Weg zum unfallvermeidenden Fahrzeug: Teil 1: Grundlagen des Systems. In: *Automobiltechnische Zeitschrift* 109 (2007), Nr. 4, S. 336–341
- [20] BENDER, E.; DARMS, M.; SCHORN, M.; STÄHLIN, U.; ISERMANN, R.; WINNER, H.; LANDAU, K.: Antikollisionssystem Proreta - Der Weg zum unfallvermeidenden Fahrzeug: Teil 2: Ergebnisse. In: *Automobiltechnische Zeitschrift* 109 (2007), Nr. 5, S. 456–463
- [21] BENMIMOUN, A.: Der Fahrer als Vorbild für Fahrerassistenzsysteme? Ein Fahrermodellbasierter Ansatz zur Entwicklung von situationsadaptiven FAS. In: FORSCHUNGSGESELLSCHAFT KRAFTFAHRWESEN AACHEN MBH (Hrsg.): *13. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik*. Aachen, 2004, S. 683–700
- [22] BIESTER, L.: Der Einsatz von Kooperation zwischen Mensch und Maschine im Kraftfahrzeug: Application of cooperation between human and machine in cars. In: VDI-

- GESELLSCHAFT FAHRZEUG- UND VERKEHRSTECHNIK (Hrsg.): *Integrierte Sicherheit und Fahrerassistenzsysteme* Bd. 1864, VDI Verlag GmbH, 2004 (VDI-Berichte), S. 263–278
- [23] BIESTER, L.: The Concept of Cooperative Automation in Cars Results from the Experiment "Overtaking on Highways". In: UNIVERSITY OF IOWA (Hrsg.): *Driving Assessment 2005: 3rd International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training, and Vehicle Design*. Iowa City, 2005, S. 342–348
- [24] BIESTER, L.: *Cooperative automation in automobiles*. Berlin, Humboldt-Universität zu Berlin, Dissertation, 2009
- [25] BLASCHKE, C.; SCHMITT, J.; FÄRBER, B.: Überholmanöver-Prädiktion über CAN-Bus-Daten. In: *Automobiltechnische Zeitschrift* 110 (2008), Nr. 11, S. 1022–1028
- [26] BRACKSTONE, M. A.; SULTAN, B.; McDONALD, M.: Findings on the approach process between vehicles - Implications for collision warning. In: *Human Performance: Driver Behavior, Road Design and Intelligent Transportation Systems - Safety and Human Performance* Bd. 1724. Washington DC and USA, 2000 (Transportation Research Record), S. 21–28
- [27] BRAESS, H.-H.; REICHART, G.: PROMETHEUS: Vision des "intelligenten Automobils auf der intelligenten Straße" - Versuch einer kritischen Würdigung: Teil 1. In: *Automobiltechnische Zeitschrift* 97 (1995), Nr. 4, S. 200–205
- [28] BRAESS, H.-H.; REICHART, G.: PROMETHEUS: Vision des "intelligenten Automobils auf der intelligenten Straße" - Versuch einer kritischen Würdigung: Teil 2. In: *Automobiltechnische Zeitschrift* 97 (1995), Nr. 6, S. 330–343
- [29] BRANDT, T.: *A Predictive Potential Field Concept for Shared Vehicle Guidance*, Universität Paderborn, Dissertation, 2007
- [30] BRANDT, T.; SATTEL, T.; BÖHM, M.: Combining haptic human-machine interaction with predictive path planning for lane-keeping and collision avoidance systems. In: IEEE (Hrsg.): *Proceedings of the 2007 IEEE Intelligent Vehicles Symposium*. 2007
- [31] BREUER, J.; GLEISSNER, S.: Neue Systeme zur Vermeidung bzw. Folgenminderung von Auffahrunfällen. In: VDI-GESELLSCHAFT FAHRZEUG- UND VERKEHRSTECHNIK (Hrsg.): *Integrierte Sicherheit und Fahrerassistenzsysteme* Bd. 1960, VDI Verlag GmbH, 2006 (VDI-Berichte), S. 393–402
- [32] BRÜDIGAM, C.: *Intelligente Fahrmanöver sehender autonomer Fahrzeuge in autobahnähnlicher Umgebung*. Neubiberg, Universität der Bundeswehr München, Dissertation, 1994
- [33] BRUNKEN, C.; SCHOMERUS, J.; LÖPER, C.; SCHIEBEN, A. M.; KELSCH, J.; KÖSTER, F.: Entwicklung haptischer Interaktionsmuster zur Führung hochautomatisierter Fahrzeuge über ein Steer-by-Wire System. In: *AAET 2012 - Automatisierungssysteme, Assistenzsysteme und eingebettete Systeme für Transportmittel*. Braunschweig : ITS Niedersachsen, 2012, S. 498–518

- [34] BUBB, H.: Systemergonomie. In: SCHMIDTKE, H. (Hrsg.): *Ergonomie*. München : Hanser Verlag, 1993
- [35] BULD, S.; TIETZE, H.; KRÜGER, H.-P.: Auswirkungen von Teilautomation auf das Fahren. In: MAURER, M. (Hrsg.); STILLER, C. (Hrsg.): *Fahrerassistenzsysteme mit maschineller Wahrnehmung*. Berlin and Heidelberg, New York : Springer, 2005, S. 161–188
- [36] BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR, BAU UND STADTENTWICKLUNG: *Straßenverkehrs-Ordnung: StVO*
- [37] CASTELFRANCHI, C.: Modelling social action for AI agents. In: *Artificial Intelligence* 103 (1998), S. 157–182
- [38] CERONE, V.; MILANESE, M.; REGRUTO, D.: Combined Automatic Lane-Keeping and Driver's Steering Through a 2-DOF Control Strategy. In: *IEEE Transactions on Control Systems Technology* 17 (2009), Nr. 1, S. 135–142
- [39] CHRISTOFFERSEN, K.; WOODS, D. D.: How to make automated systems team players. In: SALAS, E. (Hrsg.): *Advances in Human Performance and Cognitive Engineering Research* Bd. 2. Elsevier Science Ltd., 2002, S. 1–12
- [40] COLL, R.; COLL, J. H.: Cognitive Match Interface Design, A Base Concept for Guiding the Development of User Friendly Computer Application Packages. In: *Journal of Medical Systems* 13 (1989), Nr. 4, S. 227–235
- [41] DAAMEN, W.; LOOT, M.; HOOGENDOORN, S.: Empirical Analysis of Merging Behavior at Freeway On-Ramp. In: *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2188 (2010), S. 108–118
- [42] DAMBÖCK, D.; KIENLE, M.; BENGLER, K.; FLEMISCH, F. O.; KELSCH, J.; HEESSEN, M.; SCHIEBEN, A. M.: Vom Assistierten zum Hochautomatisiertem Fahren: Zwischenbericht aus den Projekten DFG-H-Mode und EU-HAVEit. In: VDI (Hrsg.): *Der Fahrer im 21. Jahrhundert* Bd. 2085. Düsseldorf : VDI Verlag GmbH, 2009
- [43] DE WAARD, D.; DIJKSTERHUIS, C.; BROOKHUIS, K. A.: Merging into heavy motorway traffic by young and elderly drivers. In: *Accident Analysis & Prevention* 41 (2009), Nr. 3, S. 588–597
- [44] DEML, B.; BLASCHKE, C.; FÄRBER, B.: Prädiktion des Fahrstils zur adaptiven Auslegung von Assistenzsystemen. In: DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR LUFT- UND RAUMFAHRT LILIENTHAL-OBERTH E.V. (Hrsg.): *48. Fachausschusssitzung Anthropotechnik Cognitive Systems Engineering in der Fahrzeug- und Prozessführung*. Karlsruhe, 2006, S. 129–143
- [45] DEUTSCHLE, S.; KESSLER, G. C.; HAKENBERG, M.; ABEL, D.: Das KONVOI Projekt – Entwicklung und Untersuchung des Einsatzes von Lkw-Konvois. In: STILLER, C. (Hrsg.); MAURER, M. (Hrsg.): *6. Workshop Fahrerassistenzsysteme*. Karlsruhe : Freundeskreis Mess- und Regelungstechnik Karlsruhe e.V., 2009, S. 126–135

- [46] DICKMANN, E. D.: Vision: Von Assistenz zum Autonomen Fahren. In: MAURER, M. (Hrsg.); STILLER, C. (Hrsg.): *Fahrerassistenzsysteme mit maschineller Wahrnehmung*. Berlin and Heidelberg, New York : Springer, 2005, S. 203–237
- [47] DONGES, E.: Aspekte der aktiven Sicherheit bei der Führung von Personenkraftwagen. In: *Automobil-Industrie* (1982), Nr. 2, S. 183–190
- [48] DONGES, E.; NAAB, K.: Regelsysteme zur Fahrzeugführung und -stabilisierung in der Automobiltechnik. In: *at - Automatisierungstechnik* 44 (1996), Nr. 5, S. 226–236
- [49] DORNIEDEN, B.; JUNGE, L.; PASCHEKA, P.: Vorausschauende energieeffiziente Fahrzeuglängsregelung. In: *Automobiltechnische Zeitschrift* 114 (2012), Nr. 03, S. 230–235
- [50] DZIENNUS, M.; KELSCH, J.; SCHIEBEN, A. M.: Ambient light based interaction concept for an integrative driver assistance system – a driving simulator study. In: DE WAARD, D. (Hrsg.); BROOKHUIS, K. A. (Hrsg.); TOFFETTI, A. (Hrsg.); STUIVER, A. (Hrsg.); WEIKERT, C. (Hrsg.); COELHI, D. (Hrsg.); MANZEY, D. (Hrsg.); ÜNAL, A. B. (Hrsg.); RÖTTER, S. (Hrsg.); MERAT, N. (Hrsg.): *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Europe Chapter 2015 Annual Conference*, 2015, S. 171–182
- [51] DZIENNUS, M.; KELSCH, J.; SCHIEBEN, A. M.: Ambient Light - An integrative, LED based interaction concept for different levels of automation. In: VDI WISSENSFORUM GMBH (Hrsg.): *Fahrerassistenz und automatisiertes Fahren* Bd. 2288, 2016 (VDI-Berichte), S. 103–110
- [52] DZIENNUS, M.; KELSCH, J.; SCHIEBEN, A. M.: Ambient light based interaction concept for an integrative driver assistance system. In: *International Conference on Traffic and Transport Psychology*, 2016
- [53] EBERSBACH, D.: *Entwurfstechnische Grundlagen für ein Fahrerassistenzsystem zur Unterstützung des Fahrers bei der Wahl seiner Geschwindigkeit*. Dresden, Technische Universität Dresden, Dissertation, 2006
- [54] EHMANN, D.: Simulationsmodell des menschlichen Spurwechselverhaltens. In: VDI-GESELLSCHAFT FAHRZEUG- UND VERKEHRSTECHNIK (Hrsg.): *Der Fahrer im 21. Jahrhundert* Bd. 1613. Düsseldorf : VDI Verlag GmbH, 2001 (VDI-Berichte), S. 203–216
- [55] EHMANN, D.: *Schriftenreihe Automobiltechnik*. Bd. 82: *Modellierung des taktischen Fahrerhaltens bei Spurwechselvorgängen*. Aachen : Forschungsgesellschaft Kraftfahrwesen Aachen (fka), 2002
- [56] EIGEL, T.; GIEBEL, T.; SCHNIEDER, E.: AKTIV IQF: Integrierte Längs- und Querverführung durch strukturvariable Regelung. In: GESAMTZENTRUM FÜR VERKEHR BRAUNSCHWEIG E.V. (Hrsg.): *AAET 2009 - Automatisierungssysteme, Assistenzsysteme und eingebettete Systeme für Transportmittel*. Braunschweig : GZVB, 2009, S. 354–367

- [57] ENDSLEY, M. R.: Toward a Theory of Situation Awareness in Dynamic Systems. In: *Human Factors* 37 (1995), Nr. 1, S. 32–64
- [58] ENDSLEY, M. R.; KIRIS, E. O.: The Out-of-the-Loop Performance Problem and Level of Control in Automation. In: *Human Factors* 37 (1995), Nr. 2, S. 381–394
- [59] FANCHER, P.; BAREKET, Z.; ERVIN, R.: Human-Centered Design of an Acc-With-Braking and Forward-Crash-Warning System. In: *Vehicle System Dynamics* 36 (2001), Nr. 2, S. 203–223
- [60] FASTENMEIER, W.; GSTALTER, H.; ZAHN, P.: Prospektive Risikopotentialabschätzung am Beispiel der Spurwechsel-Assistenz. In: VDI-GESELLSCHAFT FAHRZEUG- UND VERKEHRSTECHNIK (Hrsg.): *Der Fahrer im 21. Jahrhundert* Bd. 1613. Düsseldorf : VDI Verlag GmbH, 2001 (VDI-Berichte), S. 173–189
- [61] FASTENMEIER, W.; HINDERER, J.; LEHNIG, U.; GSTALTER, H.: Analyse von Spurwechselvorgängen im Verkehr. In: *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft* 55 (2001), Nr. 1, S. 15–23
- [62] FILZEK, B.: *Abstandsverhalten auf Autobahnen – Fahrer und ACC im Vergleich*. Darmstadt, Technische Universität Darmstadt, Dissertation, 2002
- [63] FITTS, P. M.: *Human Engineering for an Effective Air-Navigation and Traffic-Control System*. Washington, D.C., 1951
- [64] FLEGL, H.; GÖRICH, H. J.: Das europäische Forschungsprogramm PROMETHEUS und seine Ergebnisse. In: *Stuttgarter Symposium 1995: Band 3: Verkehr und Umwelt*. Stuttgart, 1995, S. U2.1–U2.17
- [65] FLEMISCH, F. O.; ADAMS, C. A.; CONWAY, S. R.; GOODRICH, K. H.; PALMER, M. T.; SCHUTTE, P. C.; NASA (Hrsg.): *The H-Metaphor as a Guideline for Vehicle Automation and Interaction*. 2003
- [66] FLEMISCH, F. O.; KELSCH, J.; LÖPER, C.; SCHIEBEN, A. M.; SCHINDLER, J.: Automation spectrum, inner / outer compatibility and other potentially useful human factors concepts for assistance and automation. In: DE WAARD, D. (Hrsg.); FLEMISCH, F. O. (Hrsg.); LORENZ, B. (Hrsg.); BROOKHUIS, K. A. (Hrsg.): *Human Factors for assistance and automation*. Maastricht and the Netherlands : Shaker Publishing, 2008, S. 257–272
- [67] FLEMISCH, F. O.; KELSCH, J.; SCHIEBEN, A. M.; SCHINDLER, J.: Stücke des Puzzles hoch-automatisiertes Fahren: H-Metapher und H-Mode, Zwischenbericht 2006. In: STILLER, C. (Hrsg.); MAURER, M. (Hrsg.): *4. Workshop Fahrerassistenzsysteme*. Karlsruhe : Freundeskreis Mess- und Regelungstechnik Karlsruhe e.V., 2006, S. 60–69
- [68] FLEMISCH, F. O.; NASHASHIBI, F.; GLASER, S.; RAUCH, N.; TEMME, G.; RESENDE, P.; VANHOLME, B.; SCHIEBEN, A. M.; LÖPER, C.; THOMAIDIS, G.; MOSEBACH, H.; SCHOMERUS, J.; KAUSSNER, A.: Towards Highly Automated Driving: Intermediate report on the HAVEit-Joint System. In: *Transport Research Arena Europe 2010*. Brüssel, 2010

- [69] FLEMISCH, F. O.; SCHOMERUS, J.; KELSCH, J.; SCHMUNTZSCH, U.: Vom Fahrer zum Reiter? Zwischenbericht 2005 auf dem Weg von der H-Metapher zum H-Mode für Bodenfahrzeuge. In: VDI-GESELLSCHAFT FAHRZEUG- UND VERKEHRSTECHNIK (Hrsg.): *Fahrer im 21. Jahrhundert* Bd. 1919. Düsseldorf : VDI Verlag GmbH, 2005 (VDI-Berichte), S. 63–74
- [70] FREYER, J.; DEML, B.; MAURER, M.; FÄRBER, B.: ACC with enhanced situation awareness to reduce behavior adaptations in lane change situations. In: IEEE (Hrsg.): *Proceedings of the 2007 IEEE Intelligent Vehicles Symposium*. 2007, S. 298–303
- [71] FUCHS-FROHNHOFEN, P.; HARTMANN, E.-A.; BRANDT, D.; WEYDANDT, D.: Designing Human-Machine Interfaces to Match the User's Mental Models. In: *Control Engineering Practice* 4 (1996), Nr. 1, S. 13–18
- [72] GACNIK, J.; HÄGER, O.; HANNIBAL, M.: A service-oriented system architecture for the human-centered design of intelligent transportation systems. In: *European Conference on Human Centred Design for Intelligent Transport Systems*, 2008, S. 175–181
- [73] GARREL, U. v.; OTTO, H.-J.; ONKEN, R.: Adaptive Modellierung des fertigkeits- und regelbasierten Fahrzeugführungsverhaltens. In: VDI-GESELLSCHAFT FAHRZEUG- UND VERKEHRSTECHNIK (Hrsg.): *Der Fahrer im 21. Jahrhundert* Bd. 1613. Düsseldorf : VDI Verlag GmbH, 2001 (VDI-Berichte), S. 239–261
- [74] GASSER, T. M.; ARZT, C.; AYOUBI, M.; BARTELS, A.; BÜRKLE, L.; EIER, J.; FLEMISCH, F. O.; HÄCKER, D.; HESSE, T.; HUBER, W.; LOTZ, C.; MAURER, M.; RUTH-SCHUMACHER, S.; SCHWARZ, J.; VOGT, W.: *Berichte der Bundesanstalt für Strassenwesen. F, Fahrzeugtechnik*. Bd. 83: *Rechtsfolgen zunehmender Fahrzeugautomatisierung: Gemeinsamer Schlussbericht der Projektgruppe*. Bremerhaven : Wirtschaftsverlag NW, 2012
- [75] GAYKO, J.: Evaluierung eines Spurhalteassistenten für das "Honda Intelligent Driver Support System". In: MAURER, M. (Hrsg.); STILLER, C. (Hrsg.): *Fahrerassistenzsysteme mit maschineller Wahrnehmung*. Berlin and Heidelberg, New York : Springer, 2005, S. 189–202
- [76] GAYKO, J.: Lane Departure Warning. In: WINNER, H. (Hrsg.); HAKULI, S. (Hrsg.); WOLF, G. (Hrsg.): *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*. Wiesbaden : Vieweg + Teubner, 2009, S. 543–553
- [77] GAYKO, J.: Lane Keeping Support. In: WINNER, H. (Hrsg.); HAKULI, S. (Hrsg.); WOLF, G. (Hrsg.): *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*. Wiesbaden : Vieweg + Teubner, 2009, S. 554–561
- [78] GERDES, A.: Automatic Maneuver Recognition in the Automobile: the Fusion of Uncertain Sensor Values using Bayesian Models. In: HAMBURG UNIVERSITY OF TECHNOLOGY (Hrsg.): *Proceedings of the 3rd International Workshop on Intelligent Transportation (WIT 2006)*. Hamburg, 2006, S. 129–133

- [79] GIBSON, J. J.; CROOKS, L. E.: A theoretical field-analysis of automobile-driving. In: *American Journal of Psychology* 51 (1938), Nr. 3, S. 453–471
- [80] GINDELE, T.; JAGSZENT, D.; PITZER, B.; DILLMANN, R.: Design of the planner of Team AnnieWAY's autonomous vehicle used in the DARPA Urban Challenge 2007. In: IEEE (Hrsg.): *Proceedings of the 2008 IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, 2008, S. 1131–1136
- [81] GRIFFITHS, P.; GILLESPIE, R. B.: Shared Control Between Human and Machine: Haptic Display of Automation During Manual Control of Vehicle Heading. In: IEEE COMPUTER SOCIETY (Hrsg.): *Proceedings of the 12th International Symposium on Haptic Interface for Virtual Environment and Teleoperator Systems*, 2004
- [82] GRIFFITHS, P.; GILLESPIE, R. B.: Sharing Control Between Human and Automation Using Haptic Interface: Primary and Secondary Task Performance Benefits. In: *Human Factors* 47 (2005), Nr. 3, S. 574–590
- [83] HAKULI, S.; GEYER, S.; WINNER, H.; HENNING, J.: Integriertes Konzept für die manöverbasierte Fahrerassistenz. In: *Automobiltechnische Zeitschrift* 113 (2011), Nr. 03, S. 220–223
- [84] HAKULI, S.; SCHREIBER, M.; WINNER, H.: Entwicklung eines Methodenkatalogs für manöverbasiertes Fahren nach dem Conduct-by-Wire-Prinzip: Ein Fahrerassistenzkonzept auf Bahnführungsebene. In: *1. Automobiltechnisches Kolloquium*. München, 2009
- [85] HEESSEN, M.; DZIENNUS, M.; HESSE, T.; SCHIEBEN, A. M.; BRUNKEN, C.; LÖPER, C.; KELSCH, J.; BAUMANN, M.: Interaction design of automatic steering for collision avoidance: challenges and potentials of driver decoupling. In: *IET Intelligent Transport Systems* 9 (2015), Nr. 1, S. 95–104
- [86] HEESSEN, M.; KELSCH, J.; LÖPER, C.; FLEMISCH, F. O.: Haptisch-multimodale Interaktion für hochautomatisierte, kooperative Fahrzeugführung bei Fahrstreifenwechsel-, Brems- und Ausweichmanövern. In: *AAET - Automatisierungssysteme, Assistenzsysteme und eingebettete Systeme für Transportmittel*. Braunschweig : ITS Niedersachsen, 2010, S. 24–44
- [87] HEIMES, F.: *Dissertationen zur künstlichen Intelligenz (DISKI)*. Bd. 243: *Sichtsystemgestützte Fahrerassistenz im innerstädtischen Straßenverkehr*. St. Augustin : infix-Verlag, 2000
- [88] HEIMES, F.; NAGEL, H.-H.: Towards Active Machine-Vision-Based Driver Assistance for Urban Areas. In: *International Journal of Computer Vision* 50 (2002), Nr. 1, S. 5–34
- [89] HERCZEG, M.: Intention-Based Supervisory Control: Kooperative Mensch-Maschine-Kommunikation in der Prozessführung. In: GRANDT, M. (Hrsg.); GÄRTNER, K.-P. (Hrsg.): *Situation Awareness in der Fahrzeug- und Prozessführung* Bd. 2002-04. Bonn : DGLR, 2002 (DGLR-Bericht), S. 29–42
- [90] HOC, J.-M.: From human - machine interaction to human - machine cooperation. In: *Ergonomics* 43 (2000), Nr. 7, S. 833–843

- [91] HOC, J.-M.: Towards a cognitive approach to human-machine cooperation in dynamic situations. In: *International Journal of Human-Computer Studies* 54 (2001), Nr. 4, S. 509–540
- [92] HOC, J.-M.; MARS, F.; MILLEVILLE-PENNEL, I.; JOLLY, E.: Human-machine co-operation in car driving for safe lateral control in bends: function delegation and mutual control. In: DE WAARD, D. (Hrsg.); BROOKHUIS, K. A. (Hrsg.); TOFFETTI, A. (Hrsg.): *Developments in Human Factors in Transportation, Design, and Evaluation*. Maastricht and the Netherlands : Shaker Publishing, 2006, S. 1–14
- [93] HOC, J.-M.; MARS, F.; MILLEVILLE-PENNEL, I.; JOLLY, E.; NETTO, M.; BLOSSEVILLE, J.-M.: Human-machine cooperation in car driving for lateral safety: delegation and mutual control. In: *Le travail humain* 69 (2006), Nr. 2, S. 153–183
- [94] HOC, J.-M.; YOUNG, M. S.; BLOSSEVILLE, J.-M.: Cooperation between drivers and automation: implications for safety. In: *Theoretical Issues in Ergonomics Science* 10 (2009), Nr. 2, S. 135–160
- [95] HOEGER, R.; AMDITIS, A.; KUNERT, M.; HOESS, A.; FLEMISCH, F. O.; KRÜGER, H.-P.; BARTELS, A.; BEUTNER, A.; PAGLE, K.: Highly Automated Vehicles for Intelligent Transport: HAVEit Approach. In: *15th World Congress and Exhibition on Intelligent Transport systems and Services*. 2008
- [96] HOEGER, R.; ZENG, H.; HOESS, A.; KRANZ, T.; BOVERIE, S.; STRAUSS, M.; JAKOBSSON, E.; BEUTNER, A.; BARTELS, A.; TO, T.-B.; STRATIL, H.; FÜRSTENBERG, K.; AHLERS, F.; FREY, E.; SCHIEBEN, A. M.; MOSEBACH, H.; FLEMISCH, F. O.; DUFAUX, A.; MANETTI, D.; AMDITIS, A.; MANTZOURANIS, I.; LEPKE, H.; SZALAY, Z.; SZABO, B.; LUTHARDT, P.; GUTKNECHT, M.; SCHOEMIG, N.; KAUSSNER, A.; NASHASHIBI, F.; RESENDE, P.; VAN-HOLME, B.; GLASER, S.; ALLEMANN, P.; SEGLÖ, F.; NILSSON, A.: *HAVEit - Deliverable D61.1 - Final Report*. 2011
- [97] HOLZMANN, F.: *Adaptive cooperation between driver and assistant system to improve the road safety*. Lausanne - Switzerland, Swiss Federal Institute of Technology, Dissertation, 2006
- [98] HOLZMANN, F.; BELLINO, M.; KOLSKI, S.; SULZMANN, A.; SPIEGELBERG, G.; SIEGWART, R.: Robots go automotive - The SPARC approach. In: IEEE (Hrsg.): *Proceedings of IEEE Intelligent Vehicles Symposium*. Las Vegas, Nevada, 2005, S. 478–483
- [99] HOLZMANN, F.; KOLSKI, S.; SULZMANN, A.; SPIEGELBERG, G.; SIEGWART, R.; BUBB, H.: Improvement of the driving safety using a virtual driver. In: IEEE (Hrsg.): *Proceedings of 8th International IEEE Conference on Intelligent Transport Systems*. Wien, 2005
- [100] HSU, J.-C.; CHEN, W.-L.; SHIEN, K. H.; YEH, E. C.: Cooperative copilot with active steering assistance for vehicle lane keeping. In: *International Journal of Vehicle Design* 19 (1998), Nr. 1, S. 78–108

- [101] HUGUENIN, R. D.: *Faktor Mensch im Verkehr*. Bd. 37: *Fahrerverhalten im Straßenverkehr: Ein Beitrag zur Theorienbildung in der Verkehrspsychologie*. Braunschweig : Rot-Gelb-Grün, 1988
- [102] INAGAKI, T.: Human-Machine Collaboration for Safety and Comfort. In: *ENRI International Workshop on ATM/CNS*. Tokyo and Japan, 2009, S. 127–130
- [103] IRMSCHER, M.: *ZMMS-Spektrum*. Bd. 12: *Modellierung und Simulation von Motivations-einflüssen auf das Fahrerverhalten*. Düsseldorf : VDI Verlag GmbH, 2001
- [104] JIMENEZ, F.; APARICIO, F.; PAEZ, J.: Evaluation of in-vehicle dynamic speed assistance in Spain: algorithm and driver behaviour. In: *IET Intelligent Transport Systems 2* (2008), Nr. 2, S. 132–142
- [105] JOHANNSEN, G.: *Mensch-Maschine-Systeme*. Berlin : Springer, 1993 (Springer-Lehrbuch)
- [106] JOHN, D.; MÖHLER, N.; ZIPSER, S.: Das SAFELANE Decision System - ein Situations- und Entscheidungsmodell für einen Spurhalteassistenten. In: VDI-GESELLSCHAFT FAHRZEUG- UND VERKEHRSTECHNIK (Hrsg.): *Integrierte Sicherheit und Fahrerassistenzsysteme* Bd. 1960, VDI Verlag GmbH, 2006 (VDI-Berichte), S. 177–188
- [107] JÜRGENSOHN, T.: *ZMMS-Spektrum*. Bd. 4: *Hybride Fahrermodelle*. Sinzheim : Pro Univer-sitate Verlag, 1997
- [108] KAHNEMANN, D.; KNETSCH, J. L.; THALER, R. H.: Anomalies: The Endowment Effect, Loss Aversion, and Status Quo Bias. In: *The Journal of Economic Perspectives* 5 (1991), Nr. 1, S. 193–206
- [109] KAMMEL, S.; ZIEGLER, J.; PITZER, B.; WERLING, M.; GINDELE, T.; JAGSZENT, D.; SCHRÖ-
DER, J.; THUY, M.; GOEBL, M.; HUNDELSHAUSEN, F. v.; PINK, O.; FRESE, C.; STILLER, C.: Team AnnieWAY's Autonomous System for the 2007 DARPA Urban Challenge. In: *Journal of Field Robotics* 25 (2008), Nr. 9, S. 615–639
- [110] KELSCH, J.; FLEMISCH, F. O.; LÖPER, C.; SCHIEBEN, A. M.; SCHINDLER, J.: Links oder rechts, schneller oder langsamer? Grundlegende Fragestellungen beim Cognitive Systems Engineering von hochautomatisierter Fahrzeugführung. In: GRANDT, M. (Hrsg.); BAUCH, A. (Hrsg.): *Cognitive Systems Engineering in der Fahrzeug- und Prozessführung* Bd. 2006-2, 2006 (DGLR-Bericht), S. 227–240
- [111] KNAKE-LANGHORST, S.; ZAMMIT-MANGION, A.: Usability of Local Traffic Density as Basis for Adaptive Driver Assistance Systems. In: *FISITA World Automotive Congress 2008*, 2008
- [112] KNAPP, A.; NEUMANN, M.; BROCKMANN, M.; WALZ, R.; WINKLE, T.: *PReVENT: RES-PONSE 3 - Code of Practice for the Design and Evaluation of ADAS*. 2009

- [113] KONDYLI, A.; ELEFTERIADOU, L.: Driver Behavior at Freeway-Ramp Merging Areas: Focus Group Findings. In: *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2124 (2009), S. 157–166
- [114] KOPF, M.: *Fortschritt-Berichte VDI Reihe 12. Bd. 203: Ein Beitrag zur modellbasierten, adaptiven Fahrerunterstützung für das Fahren auf deutschen Autobahnen*. Düsseldorf : VDI Verlag GmbH, 1994
- [115] KOPF, M.: Was nützt es dem Fahrer, wenn Fahrerinformations- und -assiszenzsysteme etwas über ihn wissen? In: MAURER, M. (Hrsg.); STILLER, C. (Hrsg.): *Fahrerassistenzsysteme mit maschineller Wahrnehmung*. Berlin and Heidelberg, New York : Springer, 2005, S. 117–139
- [116] KRAISS, K.-F.: Benutzergerechte Automatisierung - Grundlagen und Realisierungskonzepte. In: *at - Automatisierungstechnik* 46 (1998), Nr. 10, S. 457–467
- [117] KRUSE, R.; GEBHARDT, J.; KLAWONN, F.: *Fuzzy-Systeme*. Stuttgart : Teubner, 1995
- [118] LAHRES, B.; RAÝMAN, G.: *Praxisbuch Objektorientierung: Von den Grundlagen zur Umsetzung*. Bonn : Galileo Press, 2006
- [119] LAPOEHN, S.; DZIENNUS, M.; SCHIEBEN, A. M.; UTESCH, F.; HESSE, T.; KÖSTER, F.; DOTZAUER, M.; KELSCH, J.: Interaction design for nomadic devices in highly automated vehicles. In: PRINZ, W. (Hrsg.); BORCHERS, J. (Hrsg.); ZIEFLE, M. (Hrsg.): *Mensch und Computer 2016 - Workshopband*, 2016
- [120] LAPOEHN, S.; SCHIEBEN, A. M.; HESSE, T.; SCHINDLER, J.; KÖSTER, F.: Usage of Nomadic Devices in Highly-Automated Vehicles. In: *10th ITS European Congress 2014*, 2014
- [121] LAPOEHN, S.; SCHIEBEN, A. M.; HESSE, T.; SCHINDLER, J.; KÖSTER, F.: Concept of Controlling the Usage of Nomadic Devices in Highly-Automated Vehicles. In: *IET Intelligent Transport Systems* 9 (2015), Nr. 6, S. 599–605
- [122] LEE, S. E.; OLSEN, E. C. B.; WIERWILLE, W. W.; NATIONAL HIGHWAY TRAFFIC SAFETY ADMINISTRATION (Hrsg.): *A Comprehensive Examination of Naturalistic Lane-Changes*. 2004
- [123] LETHAUS, F.; RATAJ, J.: Using eye movements as a reference to identify driving manoeuvres. In: *FISITA World Automotive Congress 2008*, 2008
- [124] LEVINSON, J.; THRUN, S.: Robust Vehicle Localization in Urban Environments Using Probabilistic Maps. In: *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA) 2010*. Piscataway, NJ : IEEE, 2010, S. 4372–4378
- [125] LINDBERG, T.; SCHALLER, T.; GRADENEGGER, B.: Stauassistenz – Unterstützung des Fahrers durch Übernahme der Quer- und Längsführung im Stau: Hoch automatisiertes Fahren in Stop & Go- und Stausituationen. In: VDI (Hrsg.): *Fahrer im 21. Jahrhundert* Bd. 2015. Düsseldorf : VDI Verlag GmbH, 2007 (VDI-Berichte), S. 29–42

- [126] LÖPER, C.; BRUNKEN, C.; THOMAIDIS, G.; LAPOEHN, S.; PEKEZOU FOUOPI, P.; MOSEBACH, H.; KÖSTER, F.: Automated Valet Parking as Part of an Integrated Travel Assistance. In: IEEE (Hrsg.): *Proceedings of the IEEE ITSC 2013*, 2013, S. 2341–2348
- [127] LÖPER, C.; CATALA-PRAT, A.; GACNIK, J.; SCHOMERUS, J.; KÖSTER, F.: Vehicle Automation in Cooperation with V2I and Nomadic Devices Communication. In: IEEE (Hrsg.): *Proceedings of the IEEE ITSC 2011*, 2011, S. 650–655
- [128] LÖPER, C.; FLEMISCH, F. O.: Ein Baustein für hochautomatisiertes Fahren: Kooperative, manöverbasierte Automation in den Projekten H-Mode und HAVEit. In: STILLER, C. (Hrsg.); MAURER, M. (Hrsg.): *6. Workshop Fahrerassistenzsysteme*. Karlsruhe : Freundeskreis Mess- und Regelungstechnik Karlsruhe e.V., 2009, S. 136–146
- [129] LÖPER, C.; KELSCH, J.; FLEMISCH, F. O.: Kooperative, manöverbasierte Automation und Arbitrierung als Bausteine für hochautomatisiertes Fahren. In: GESAMTZENTRUM FÜR VERKEHR BRAUNSCHWEIG E.V. (Hrsg.): *AAET 2008 - Automatisierungssysteme, Assistenzsysteme und eingebettete Systeme für Transportmittel*. Braunschweig : GZVB, 2008, S. 215–237
- [130] LUDMANN, J.; WEILKES, M.: Fahrermodelle als Hilfsmittel für die Entwicklung von ACC-Systemen. In: *Automobiltechnische Zeitschrift* 101 (1999), Nr. 5, S. 306–314
- [131] MAURER, M.: *Flexible Automation von Straßenfahrzeugen mit Rechnersehen*, Universität der Bundeswehr München, Dissertation, 2000
- [132] MAYSER, C.; LIPPOLD, C.; EBERSBACH, D.; DIETZE, M.: Fahrerassistenzsysteme zur Unterstützung der Längsregelung im ungebundenen Verkehr. In: TU MÜNCHEN - LEHRSTUHL FÜR FAHRZEUGTECHNIK (Hrsg.): *Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenzsysteme*. Garching, 2004
- [133] MAYSER, C.; NAAB, K.; KAGERER, W.: Interactive Cruise Control - A new Driver Interaction Concept for Adaptive Cruise Control Systems. In: *SAE 2006 World Congress & Exhibition*, 2006
- [134] MICHELS, K.; KLAWONN, F.; KRUSE, R.; NÜRNBERGER, A.: *Fuzzy-Regelung: Grundlagen, Entwurf, Analyse*. Berlin and Heidelberg : Springer, 2002
- [135] MICHON, J. A.: A critical view of Driver Behavior Models: What do we know, what should we know? In: EVANS, L. (Hrsg.); SCHWING, R. C. (Hrsg.): *Human Behavior and Traffic Safety*. New York : Plenum Press, 1985, S. 485–520
- [136] MILDNER, F.: *Untersuchungen zur Erkennung und Vermeidung von Unfällen für Kraftfahrzeuge*. Hamburg, Helmut Schmitdt Universität / Universität der Bundeswehr, Dissertation, 2004
- [137] MILLER, C. A.; PARASURAMAN, R.: Designing for Flexible Interaction Between Humans and Automation: Delegation Interfaces for Supervisory Control. In: *Human Factors* 49 (2007), Nr. 1, S. 57–75

- [138] MONTEMERLO, M.; BECKER, J. C.; BHAT, S.; DAHLKAMP, H.; DOLGOV, D.; ETTINGER, S.; HAEHNEL, D.; HILDEN, T.; HOFFMANN, G.; HUHNKE, B.; JOHNSTON, D.; KLUMPP, S.; LANGER, D.; LEVANDOWSKI, A.; LEVINSON, J.; MARCIL, J.; ORENSTEIN, D.; PAEFGEN, J.; PENNY, I.; PETROVSKAYA, A.; PFLUEGER, M.; STANEK, G.; STAVENS, D.; VOGT, A.; THRUN, S.: Junior: The Stanford Entry in the Urban Challenge. In: *Journal of Field Robotics* 25 (2008), Nr. 9, S. 569–597
- [139] NAAB, K.: Automatisierung bei der Fahrzeugführung im Straßenverkehr. In: *at - Automatisierungstechnik* 48 (2000), Nr. 5, S. 211–223
- [140] NAGEL, H.-H.: Wodurch zeichnet sich ein "umsichtiges" Automobil aus? oder Zur Frage der impliziten und expliziten Repräsentation von Wissen in maschinellen Ko-Piloten für den Straßenverkehr. In: VDI-GESELLSCHAFT FAHRZEUG- UND VERKEHRSTECHNIK (Hrsg.): *Elektronik im Kraftfahrzeug* Bd. 687. Düsseldorf : VDI Verlag GmbH, 1988 (VDI-Berichte), S. 25–40
- [141] NAGEL, H.-H.: AI approaches towards sensor-based driver support in road vehicles. In: NEBEL, B. (Hrsg.): *KI-94: Advances in Artificial Intelligence* Bd. 861/1994. Berlin and Heidelberg : Springer, 1994, S. 1–15
- [142] NAGEL, H.-H.: A Vision of 'Vision and Language' Comprises Action: An Example from Road Traffic. In: *Artificial Intelligence Review* 8 (1994), S. 189–214
- [143] NAGEL, H.-H.: Zur Ergänzung induktiver FAS-Entwicklungen durch einen deduktiven Ansatz. In: STILLER, C. (Hrsg.); MAURER, M. (Hrsg.): *4. Workshop Fahrerassistenzsysteme*. Karlsruhe : Freundeskreis Mess- und Regelungstechnik Karlsruhe e.V., 2006, S. 135–142
- [144] NAGEL, H.-H.; ARENS, M.: 'Innervation des Automobils' und formale Logik. In: MAURER, M. (Hrsg.); STILLER, C. (Hrsg.): *Fahrerassistenzsysteme mit maschineller Wahrnehmung*. Berlin and Heidelberg, New York : Springer, 2005, S. 89–116
- [145] NAGEL, H.-H.; ENKELMANN, W.: Generic Road Traffic Situations and Driver Support Systems. In: *Proceedings of the 5th PROMETHEUS Workshop*. München, 1991, S. 76–85
- [146] NAGEL, H.-H.; ENKELMANN, W.; STRUCK, G.: FhG-Co-driver: From map-guided automatic driving by machine vision to a cooperative driver support. In: *Mathematical and Computer Modelling* 22 (1995), Nr. 4-7, S. 185–212
- [147] NAVARRO, J.; MARS, F.; HOC, J.-M.: Lateral Control Support for Car Drivers: a Human-Machine Cooperation Approach. In: *Proceedings of the ECCE 2007 Conference*, 2007, S. 249–252
- [148] NETTO, M.; LABAYRADE, R.; IENG, S.-S.; LUSETTI, B.; BLOSSEVILLE, J.-M.; MAMMAR, S.: Different Modes on Shared Lateral Control. In: *10th World Congress and Exhibition on Intelligent Transport systems and Services*, 2003

- [149] NICKEL, M.; HUGEMANN, W.: Längs- und Querbesehleunigungen im Alltagsverkehr. In: *EVU Conference*. Zürich and Schweiz, 2003
- [150] NIELSEN, J.; NIELSEN NORMAN GROUP (Hrsg.): *How Many Test Users in a Usability Study?* <https://www.nngroup.com/articles/how-many-test-users/>. Version: 04.06.2012
- [151] NIELSEN, J.: *Usability engineering*. Boston : Academic Press, 1993
- [152] NIELSEN, J.; LANDAUER, T. K.: A mathematical model of the finding of usability problems. In: *Proceedings of ACM INTERCHI'93 Conference*, ACM, 1993, S. 206–213
- [153] NIGRO, J.-M.; LORIETTE-ROUGEGREZ, S.; ROMBAUT, M.: Driving situation recognition with uncertaintymanagement and rule-based systems. In: *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 15 (2002), Nr. 3-4, S. 217–228
- [154] NORMAN, D. A.: Some Observations on Mental Models. In: GENTNER, D. (Hrsg.); STEVENS, A. (Hrsg.): *Mental Models*. 1983, S. 7–14
- [155] NORMAN, D. A.: The 'problem' with automation: inappropriate feedback and interaction, not 'over-automation'. In: *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B* 327 (1990), S. 535–593
- [156] NOTHDURFT, T.; HECKER, P.; OHL, S.; SAUST, F.; MAURER, M.; RESCHKA, A.; BÖHMER, J. R.: Stadtpilot: First Fully Autonomous Test Drives in Urban Traffic. In: IEEE (Hrsg.): *Proceedings of the IEEE ITSC 2011*, 2011, S. 919–924
- [157] OESTEREICH, B.: *Die UML 2.0 Kurzreferenz für die Praxis*. 4. überarb. Aufl. München : Oldenbourg, 2005
- [158] OLIVER, N.; PENTLAND, A. P.: Driver Behavior Recognition and Prediction in a Smart-Car. In: JACQUES G. VERLY (Hrsg.): *Enhanced and Synthetic Vision 2000* Bd. 4023, 2000 (Proceedings SPIE), S. 280–290
- [159] ONKEN, R.: Human Process Control and Automation - still compatible concepts? In: BORYS, B.-B. (Hrsg.); WITTENBERG, C. (Hrsg.): *From muscles to music* Bd. 1. Kassel : Kassel University Press, 2003, S. 75–87
- [160] ONKEN, R.; OTTO, H.-J.; GARREL, U. v.: Adaptive Modellierung des Fahrerverhaltens - Ein Kernelement für die kognitive Kooperation bei zukünftiger Fahrerassistenz. In: JÜRGENSOHN, T. (Hrsg.); TIMPE, K.-P. (Hrsg.): *Kraftfahrzeugführung*. Berlin : Springer, 2001, S. 81–93
- [161] ONKEN, R.; WALSDORF, A.: Assistant systems for aircraft guidance: cognitive man-machine cooperation. In: *Aerosp. Sci. Technol.* 5 (2001), S. 511–520
- [162] PARASURAMAN, R.; SHERIDAN, T. B.; WICKENS, C. D.: A Model for Types and Levels of Human Interaction with Automation. In: *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics - Part A: Systems and Humans* 30 (2000), Nr. 3, S. 286–297

- [163] PELLKOFER, M.: *Verhaltensentscheidung für autonome Fahrzeuge mit Blickrichtungssteuerung*, Universität der Bundeswehr München, Dissertation, 2003
- [164] PFEIFFER, B.-M.; JÄKEL, J.; KROLL, A.; KUHN, C.; KUNTZE, H.-B.; LEHMANN, U.; SLAWINSKI, T.; TEWS, V.: Erfolgreiche Anwendungen von Fuzzy Logik und Fuzzy Control (Teil 1). In: *at - Automatisierungstechnik* 50 (2002), Nr. 10, S. 461–471
- [165] PFEIFFER, B.-M.; JÄKEL, J.; KROLL, A.; KUHN, C.; KUNTZE, H.-B.; LEHMANN, U.; SLAWINSKI, T.; TEWS, V.: Erfolgreiche Anwendungen von Fuzzy Logik und Fuzzy Control (Teil 2). In: *at - Automatisierungstechnik* 50 (2002), Nr. 11, S. 511–521
- [166] POLYCHRONOPOULOS, A.; MÖHLER, N.; GHOSH, S.; BEUTNER, A.: System Design of a Situation Adaptive Lane Keeping Support System, the SAFELANE System. In: VALLDORF, J. (Hrsg.); GESSNER, W. (Hrsg.): *Advanced Microsystems for Automotive Applications 2005*. Berlin and Heidelberg : Springer, 2005
- [167] RASMUSSEN, J.: Skills, rules, and knowledge; signals, signs, and symbols, and other distinctions in human performance models. In: *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics* 13 (1983), Nr. 3, S. 257–266
- [168] RAUSKOLB, F. W.; BERGER, K.; LIPSKI, C.; MAGNOR, M.; CORNELSEN, K.; EFFERTZ, J.; FORM, T.; GRAEFE, F.; OHL, S.; SCHUMACHER, W.; WILLE, J.-M.; HECKER, P.; NOTHDURFT, T.; DOERING, M.; HOMEIER, K.; MORGENROTH, J.; WOLF, L.; BASARKE, C.; BERGER, C.; GÜLKE, T.; KLOSE, F.; RUMPE, B.: Caroline: An Autonomously Driving Vehicle for Urban Environments. In: *Journal of Field Robotics* 25 (2008), Nr. 9, S. 674–724
- [169] REICHARDT, D.: Using Automated Assistance Systems - Putting The Driver Into Focus. In: IEEE (Hrsg.): *Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Intelligent Vehicles*, 1998, S. 413–418
- [170] REKERSBRINK, A.: *Verkehrsflusssimulation mit Hilfe der Fuzzy-Logik und einem Konzept potentieller Kollisionszeiten*. Karlsruhe, Universität Karlsruhe, Dissertation, 1994
- [171] SAMUELSON, W.; ZECKHAUSER, R.: Status Quo Bias in Decision Making. In: *Journal of Risk and Uncertainty* 1 (1988), S. 7–59
- [172] SANDKÜHLER, D.: *Schriftenreihe Automobiltechnik*. Bd. 97: *Automatische Fahrzeuglängsführung unter Berücksichtigung situationsspezifischen Fahrerverhaltens*. Aachen : Forschungsgesellschaft Kraftfahrwesen Aachen (fka), 2008
- [173] SATTEL, T.; BRANDT, T.: From robotics to automotive: Lane-keeping and collision avoidance based on elastic bands. In: *Vehicle System Dynamics* 46 (2008), Nr. 7, S. 597–619
- [174] SATTEL, T.; HESSE, T.; SONDERMANN-WÖLKE, C.: Automatisches Ausweichen in dynamischer Umgebung für Fahrerassistenzsysteme zur Kollisionsvermeidung. In: TU MÜNCHEN - LEHRSTUHL FÜR FAHRZEUGTECHNIK (Hrsg.): *Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenzsysteme*. Garching bei München, 2008

- [175] SCHEBITZ, N.; KNAKE-LANGHORST, S.; LÖPER, C.; KREHLE, T.; KÖSTER, F.: Entwicklung und Test eines Ein- und Ausfädelassistenten. In: VDI-GESELLSCHAFT FAHRZEUG- UND VERKEHRSTECHNIK (Hrsg.): *Fahrerassistenz und integrierte Sicherheit* Bd. 2166. Düsseldorf : VDI Verlag GmbH, 2012 (VDI-Berichte), S. 191–202
- [176] SCHIEBEN, A. M.; FLEMISCH, F. O.: Who is in control? Exploration of transitions of control between driver and an eLane vehicle automation. In: VDI-GESELLSCHAFT FAHRZEUG- UND VERKEHRSTECHNIK (Hrsg.): *Integrierte Sicherheit und Fahrerassistenzsysteme* Bd. 2048. Düsseldorf : VDI Verlag GmbH, 2008 (VDI-Berichte), S. 455–469
- [177] SCHIEBEN, A. M.; TEMME, G.; KÖSTER, F.; FLEMISCH, F. O.: How to interact with a highly automated vehicle. Generic interaction design schemes and test results of a usability assessment. In: DE WAARD, D. (Hrsg.); GÉRARD, N. (Hrsg.); ONNASCH, L. (Hrsg.); WICZOREK, R. (Hrsg.); MANZEY, D. (Hrsg.): *Human Centred Automation*. Maastricht : Shaker Publishing, 2011, S. 251–267
- [178] SCHINDLER, J.; TEMME, G.; SCHIEBEN, A. M.; FLEMISCH, F. O.: Exploratory Design of a Highly Automated System for Entering the Expressway. In: *Human Factors and Ergonomics Society Europe Chapter Annual Meeting*, 2009
- [179] SCHNEIDER, H.: *Modellierung und Erkennung von Fahrsituationen und Fahrmanövern für sicherheitsrelevante Fahrerassistenzsysteme*. Chemnitz, Technische Universität Chemnitz, Dissertation, 2009
- [180] SCHOMERUS, J.; GUTKNECHT, M.; LUITHARDT, P.; MOSEBACH, H.; KÖSTER, F.: Ein Steer-by-Wire-System für hochautomatisierte PKW. In: VDI (Hrsg.): *Mechatronik 2011*. Düsseldorf : VDI Verlag GmbH, 2011, S. 115–120
- [181] SCHREIBER, M.; KAUER, M.; BRUDER, R.: Conduct by wire - maneuver catalog for semi-autonomous vehicle guidance. In: IEEE (Hrsg.): *IEEE Intelligent Vehicles Symposium 2009* Bd. 1279-1284, 2009
- [182] SCHREINER, F.: *Fortschritt-Berichte VDI Reihe 12*. Bd. 404: *Automatische Führung des Kraftfahrzeugs mit fahreradaptiven Eigenschaften*. Düsseldorf : VDI Verlag GmbH, 1999
- [183] SCHRÖDER, J.; HOFFMANN, M.; ZÖLLNER, M.; DILLMANN, R.: Behavior Decision and Path Planning for Cognitive Vehicles using Behavior Networks. In: IEEE (Hrsg.): *Proceedings of the 2007 IEEE Intelligent Vehicles Symposium*. 2007, S. 710–715
- [184] SCHUBERT, R.; SCHULZE, K.; WANIELIK, G.: Fahrzeugumfeldererkennung und probabilistische Modellierung von Manöverentscheidungen. In: STILLER, C. (Hrsg.); MAURER, M. (Hrsg.): *6. Workshop Fahrerassistenzsysteme*. Karlsruhe : Freundeskreis Mess- und Regelungstechnik Karlsruhe e.V., 2009, S. 147–156
- [185] SCHULTE, A.: Cognitive Automation for Tactical Mission Management: Concept and Prototype Evaluation in Flight Simulator Trials. In: *Cognition, Technology & Work* 4 (2002), Nr. 3, S. 146–159

- [186] SCHULTE, A.; STÜTZ, P.: Evaluation of the Cockpit Assistant Military Aircraft CAMA in Simulator Trials. In: *NATO RTO System Concepts and Integration Panel Symposium*. Ottawa and Canada, 1998
- [187] SENTOUH, C.; GLASER, S.; MAMMAR, S.: Advanced vehicle-infrastructure-driver speed profile for road departure accident prevention. In: *Vehicle System Dynamics* 44 (2006), Nr. 1, S. 612–623
- [188] SHERIDAN, T. B.: *Telerobotics, Automation, and Human Supervisory Control*. Cambridge, MA : MIT Press, 1992
- [189] SIEDERSBERGER, K.-H.: *Komponenten zur automatischen Fahrzeugführung in sehenden (semi-)autonomen Fahrzeugen*, Universität der Bundeswehr München, Dissertation, 2003
- [190] SPORRER, A.; PRELL, G.; BUCK, J.; SCHAIBLE, S.: Realsimulation von Spurwechselvorgängen im Straßenverkehr. In: *Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik* (1998), Nr. 3
- [191] STÄHLIN, U.: *Eingriffsentscheidung für ein Fahrerassistenzsystem zur Unfallvermeidung*. Düsseldorf : VDI Verlag GmbH, 2008 (VDI-Berichte)
- [192] STILLER, C.: Fahrerassistenzsysteme - Von realisierten Funktionen zum vernetzt wahrnehmenden, selbstorganisierenden Verkehr. In: MAURER, M. (Hrsg.); STILLER, C. (Hrsg.): *Fahrerassistenzsysteme mit maschineller Wahrnehmung*. Berlin and Heidelberg, New York : Springer, 2005, S. 1–20
- [193] TEMME, G.; KELSCH, J.; KÖSTER, F.: Domänenübergreifendes Gestalten von Kooperativen Systemen. In: DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR LUFT- UND RAUMFAHRT - LILIENTHAL-OBERTH E.V. (Hrsg.): *63. Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress*, 2014
- [194] THRUN, S.; MONTEMERLO, M.; DAHLKAMP, H.; STAVENS, D.; ARON, A.; DIEBEL, J.; FONG, P.; GALE, J.; HALPENNY, M.; HOFFMANN, G.; LAU, K.; OAKLEY, C.; PALATUCCI, M.; PRATT, V.; STANG, P.: Stanley: The Robot that Won the DARPA Grand Challenge. In: *Journal of Field Robotics* 23 (2006), Nr. 9, S. 661–692
- [195] THUY, M.; GOEBL, M.; RATTEI, F.; ALTHOFF, M.; OBERMEIER, F.; HAWE, S.; NAGEL, R.; KRAUS, S.; WANG, C.; HECKER, F.; RUSS, M.; SCHWEITZER, M.; PUENTE LEON, F.; FÄRBER, G.; BUSS, M.; DIEPOLD, K.; EBERSPÄCHTER, J.; HEISSING, B.; WÜNSCHE, H.-J.: Kognitive Automobile – neue Konzepte und Ideen des Sonderforschungsbereiches / TR-28. In: TU MÜNCHEN - LEHRSTUHL FÜR FAHRZEUGTECHNIK (Hrsg.): *Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenzsysteme*. Garching bei München, 2008
- [196] TOFFETTI, A.; WILSCHUT, E. S.; MARTENS, M. H.; SCHIEBEN, A. M.; RAMBALDINI, A.; MERAT, N.; FLEMISCH, F. O.: CityMobil: Human Factors Issues Regarding Highly-Automated Vehicles on an eLane. In: *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* (2009), Nr. 2110, S. 1–8

- [197] TÖLLE, W.: *Fortschritt-Berichte VDI Reihe 12*. Bd. 299: *Ein Fahrmanöverkonzept für einen maschinellen Kopiloten*. Düsseldorf : VDI Verlag GmbH, 1996
- [198] UNBEHAUEN, H.: *Regelungstechnik I: Klassische Verfahren zur Analyse und Synthese linearer kontinuierlicher Regelsysteme, Fuzzy-Regelsysteme*. Braunschweig/ Wiesbaden : Friedr. Vieweg & Sohn Verlag, 2002
- [199] URMSON, C.; ANHALT, J.; BAGNELL, D.; BAKER, C.; BITTNER, R.; CLARK, M. N.; DOLAN, J.; DUGGINS, D.; GALATALI, T.; GEYER, C.; GITTLEMAN, M.; HARBAUGH, S.; HEBERT, M.; HOWARD, T. M.; KOLSKI, S.; KELLY, A.; LIKHACHEV, M.; MCNAUGHTON, M.; MILLER, N.; PETERSON, K.; PILNICK, B.; RAJKUMAR, R.; RYBSKI, P.; SALESKY, B.; SEO, Y.-W.; SINGH, S.; SNIDER, J.; STENTZ, A.; WHITTAKER, W.; WOLKOWICKI, Z.; ZIGLAR, J.; BAE, H.; BROWN, T.; DEMITRISH, D.; LITKOUHI, B.; NICKOLAOU, J.; SADEKAR, V.; ZHANG, W.; STRUBLE, J.; TAYLOR, M.; DARMS, M.; FERGUSON, D.: Autonomous Driving in Urban Environments: Boss and the Urban Challenge. In: *Journal of Field Robotics* 25 (2008), Nr. 8, S. 425–466
- [200] VAN WINSUM, W.; DE WAARD, D.; BROOKHUIS, K. A.: Lane change manoeuvres and safety margins. In: *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour* 2 (1999), S. 139–149
- [201] VOY, C.; HAMM, L.; PANIK, F.; REISTER, D.: Prometheus, ein europäisches Forschungsprojekt zur Gestaltung des Straßenverkehrs der Zukunft. In: VDI-GESELLSCHAFT FAHRZEUG- UND VERKEHRSTECHNIK (Hrsg.): *Elektronik im Kraftfahrzeug* Bd. 612. Düsseldorf : VDI Verlag GmbH, 1986 (VDI-Berichte), S. 1–13
- [202] VUKOTICH, A.; POPKEN, M.; ROSENOW, A.; LÜBCKE, M.: Fahrerassistenzsysteme. In: *Sonderausgabe von ATZ und MTZ* (2008), Nr. 2, S. 170–173
- [203] WANG, Y.-M.; PARKAN, C.: Multiple attribute decision making based on fuzzy preference information on alternatives: Ranking and weighting. In: *Fuzzy Sets and Systems* (2005), Nr. 153, S. 331–346
- [204] WEILKES, M.; BAUM, D.; HUMMEL, M.; MAURER, M.; SAUERBREY, M.: Stauassistent – Systemkonzept und Funktionalität. In: *Telematik im Kraftfahrzeug* Bd. 1728. Düsseldorf : VDI Verlag GmbH, 2002 (VDI-Berichte)
- [205] WEILKES, M.; BÜRKLE, L.; RENTSCHLER, T.; SCHERL, M.: Zukünftige Fahrzeugführungsassistent – Kombinierte Längs- und Querregelung. In: *at - Automatisierungstechnik* 53 (2005), Nr. 1, S. 4–10
- [206] WIEDEMANN, R.: *Simulation des Straßenverkehrsflusses*. Karlsruhe, Universität Karlsruhe, Dissertation, 1974
- [207] WIENER, E. L.: *Human Factors of Advanced Technology ("Glass Cockpit") Transport Aircraft: NASA-CR-117528*. Moffett Field, CA, 1989

- [208] WILLE, J.-M.; SAUST, F.; MAURER, M.: Segmentübergreifende Bahnplanung mittels eines analytischen Optimierungsverfahrens für die autonome Fahrzeugführung auf dem Braunschweiger Stadtring. In: STILLER, C. (Hrsg.); MAURER, M. (Hrsg.): *6. Workshop Fahrerassistenzsysteme*. Karlsruhe : Freundeskreis Mess- und Regelungstechnik Karlsruhe e.V., 2009, S. 97–105
- [209] WILLE, J.-M.; SAUST, F.; MAURER, M.: Stadtpilot: Driving autonomously on Braunschweig's inner ring road. In: *2010 IEEE Intelligent Vehicles Symposium*. Piscataway, NJ : IEEE, 2010, S. 506–511
- [210] WINNER, H.: Frontalkollisionsschutzsysteme. In: WINNER, H. (Hrsg.); HAKULI, S. (Hrsg.); WOLF, G. (Hrsg.): *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*. Wiesbaden : Vieweg + Teubner, 2009, S. 522–542
- [211] WINNER, H.; DANNER, B.; STEINLE, J.: Adaptive Cruise Control. In: WINNER, H. (Hrsg.); HAKULI, S. (Hrsg.); WOLF, G. (Hrsg.): *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*. Wiesbaden : Vieweg + Teubner, 2009, S. 478–521
- [212] WINNER, H.; HAKULI, S.; BRUDER, R.; KONIGORSKI, U.; SCHIELE, B.: Conduct by Wire - ein neues Paradigma für die Weiterentwicklung der Fahrerassistenz. In: STILLER, C. (Hrsg.); MAURER, M. (Hrsg.): *4. Workshop Fahrerassistenzsysteme*. Karlsruhe : Freundeskreis Mess- und Regelungstechnik Karlsruhe e.V., 2006, S. 112–124
- [213] YOUNG, M. S.; STANTON, N. A.; HARRIS, D.: Driving automation: Learning from aviation about design philosophies. In: *International Journal of Vehicle Design* 45 (2007), Nr. 3, S. 323–338
- [214] ZADEH, L. A.: Fuzzy Sets. In: *Information and Control* 8 (1965), S. 338–353
- [215] ZHENG, P.; McDONALD, M.: Manual vs. adaptive cruise control – Can driver's expectation be matched? In: *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 13 (2005), S. 421–431
- [216] ZIMMERMANN, H.-J.: *Fuzzy Set Theory and its Applications*. 4. Berlin and Heidelberg : Springer, 2001
- [217] ZLOCKI, A.: Fahrsituationsabhängig geregeltes ACC-System für den Einsatz im urbanen Umfeld. In: GESAMTZENTRUM FÜR VERKEHR BRAUNSCHWEIG E.V. (Hrsg.): *AAET 2008 - Automatisierungssysteme, Assistenzsysteme und eingebettete Systeme für Transportmittel*. Braunschweig : GZVB, 2008, S. 165–180